

А. Д. КУЗЬМИН, А. Г. СОЛОВЬЕВ

ОЦЕНКА С.В.Ч. ПОГЛОЩЕНИЯ В ВОДОРОДЕ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ПО РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ ПЛАНЕТЫ УРАН

(Представлено академиком Н. Г. Басовым 26 V 1971)

В нормальных условиях молекула водорода является симметричной и поэтому не имеет электрического или дипольного момента и не взаимодействует с радиоизлучением. Однако при высоких давлениях соударения вызывают кратковременные деформации, создающие асимметрию молекулы и дипольный электрический момент, обуславливающий нерезонансное поглощение с.в.ч. излучения. Коэффициент такого поглощения, называемого индуцированным, пропорционален квадрату давления p и квадрату частоты ν и определяется соотношением

$$\kappa = \kappa_0 p^2 \nu^2 (273 / T)^m. \quad (1)$$

Согласно теоретической оценке Мариотта и Бирнбаума ⁽¹⁾ и измерения температурной зависимости поглощения в CO_2 , N_2 и Ar ⁽²⁾, степенной показатель $m = 3,8-5$ и не зависит от рода газа.

Единственная попытка измерения поглощения радиоизлучения в водороде была предпринята Бирнбаумом и Мариоттом ⁽³⁾. Ими проведены лабораторные измерения методом изменения добротности объемного резонатора на частоте 24 ГГц при температуре 25°C и давлениях от 1 до 103 атм. Однако даже при максимальном давлении 103 атм поглощение было меньше предельной чувствительности метода, соответствующей мнимой части диэлектрической проницаемости $\epsilon'' = 2 \cdot 10^{-7}$. В пересчете на $p = 1$ атм, $T = 273^\circ \text{K}$ и длину волны $\lambda = 1$ см это определяет верхний предел $\kappa_0 < 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$.

Дальнейшее повышение чувствительности метода с целью уменьшения указанного верхнего предела сопряжено с необходимостью проводить измерения при давлениях в сотни и тысячи атмосфер.

Нами предлагается другой метод определения κ_0 , основанный на анализе распространения с.в.ч. излучения в атмосферах больших планет, содержащих водород при высоких давлениях. Большие длины пути исследуемого радиоизлучения по сравнению с лабораторными установками дают возможность повысить точность определения κ_0 на несколько порядков.

Как известно, измеряемая в радиоастрономии яркостная температура теплового радиоизлучения атмосферы планеты определяется соотношением

$$\bar{T}_\pi = \int_0^1 \int_0^{\tau_m} T(\tau) e^{-\tau/\mu} d\tau d\mu, \quad (2)$$

где $\tau = \int_0^h \kappa(h) dh$ — оптическая толщина атмосферы. Отсюда для принятой модели распределения температуры и давления по высоте, решая обратную задачу, по измеренному $\bar{T}_\pi$ можно определить коэффициент поглощения κ .

Нами произведена оценка с.в.ч. поглощения в водороде при высоких давлениях на основе данных радиоастрономических измерений яркостной температуры Урана $\bar{T}_{\text{яу}}$ (⁴⁻¹⁰). Расчет произведен при следующих исходных параметрах и предположениях:

1) температура и давление на уровне формирования спектральных линий H_2 и CH_4 равны $T_0 = 55^\circ \text{K}$ и $p_0 = 3 \text{ атм}$ (¹¹). Выше этого уровня атмосфера изотермическая с $T = T_0 = 55^\circ \text{K}$, ниже этого уровня атмосфера политропная, т. е.

$$T(h) = T_0 + \beta h, \\ p(h) = p_0 (T / T_0)^{\mu g / (\beta R)}, \quad (3)$$

где h — высота, β — температурный градиент, μ — молекулярный вес, g — ускорение силы тяжести, R — универсальная газовая постоянная;

2) основной компонентой атмосферы Урана является H_2 ;

3) поглощение и излучение радиоволн обусловлены водородом.

В связи с тем, что индуцированное поглощение обратно пропорционально квадрату длины волны, расчет проведен на наиболее короткой волне $\lambda = 0,34 \text{ см}$, для которой имеются радиоастрономические наблюдения Урана (^{4, 5}) для наименьшей в пределах ошибки измерения величины яркостной температуры на этой длине волны $\bar{T}_{\text{яу}} = 105^\circ \text{K}$. Результаты расчета κ_0 (в единицах 10^{-10}) для адиабатической ($\beta = \beta_a = 0,78 \text{ град/км}$) и субадиабатической ($\beta = 0,75 \beta_a$) моделей приведены в табл. 1.

Как указывалось выше, при расчете κ_0 было принято, что поглощение и излучение радиоволн обусловлены только водородом. Однако кроме водорода, являющегося основной компонентой, в атмосфере Урана могут быть какие-либо малые составляющие, не отождествленные спектрально из-за их низкой концентрации,

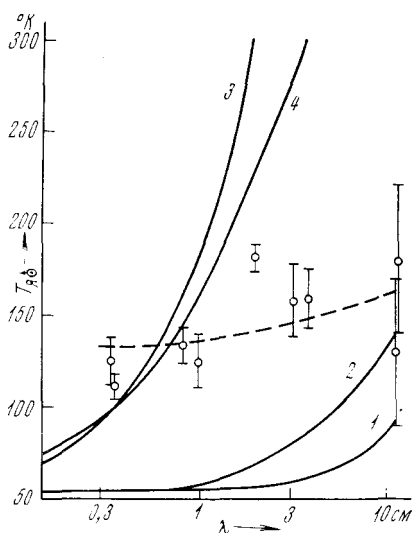


Рис. 1. Результаты измерений и расчетов зависимости $\bar{T}_{\text{яу}}(\lambda)$. Приведены результаты измерений на волнах 0,33 см (⁴); 0,35 см, 0,95 см, 1,95 см (⁵); 0,82 см (⁶); 3,12 см (⁷); 3,65 см (⁸); 11 см (⁹) и 11,3 см (¹⁰). 1 — $\kappa_0 = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$, $m = 5$; 2 — $\kappa_0 = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$, $m = 3,5$; 3 — $\kappa_0 = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-1}$; $m = 5$; 4 — $\kappa_0 = 12,4 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-1}$; $m = 3,5$. Пунктиром показан расчет для аммиачно-водородной модели (¹²)

Однако кроме водорода, являющегося основной компонентой, в атмосфере Урана могут быть какие-либо малые составляющие, не отождествленные спектрально из-за их низкой концентрации,

Таблица 1

	β	$m = 3,5$	$m = 5$
Водородная атмосфера	β_a	0,0124	0,0025
	$0,75 \beta_a$	0,0088	0,0020
Водородно-гелиевая атмосфера $m_{\text{He}}/m_{\text{H}_2} = 0,5$	β_a	0,0149	0,0035
	$0,75 \beta_a$	0,0126	0,0028
Водородно-гелиевая атмосфера $m_{\text{He}}/m_{\text{H}_2} = 1$	β_a	0,0203	0,0045
	$0,75 \beta_a$	0,0169	0,0035

но имеющие значительное поглощение на с.в.ч. В этом случае эти составляющие увеличат общее поглощение и величины κ_0 , приведенные в табл. 1, будут уже верхним пределом коэффициента поглощения в водороде. Для решения этого вопроса, нами исследована возможность согласования модели атмосферы с поглощением только в водороде с результатами всех

радиоастрономических измерений Урана (⁴⁻¹⁰). Расчет яркостных температур $T_{\lambda y}$ в диапазоне длин волн 0,3—10 см, для которого проведены радиоастрономические измерения этой планеты, и сопоставление расчета с измерениями (рис. 1) показали, что, согласуясь с экспериментом на волне 0,34 см, расчетные яркостные температуры значительно превышают измеренные на более длинных волнах. В единственно удовлетворяющей как радиоастрономическим, так и инфракрасным измерениям модели атмосферы с увеличением температуры в глубину, это превышение указывает на необходимость дополнительного поглощения в длинноволновой части спектра $\bar{T}_{\lambda y}(\lambda)$.

С целью уменьшения указанное рассогласование были рассмотрены модели с другим химическим составом: водородно-гелиевая атмосфера с соотношением $m_{He}/m_{H_2} = 0,5$, соответствующим космической распространенности элементов во Вселенной, для которой $\beta_a = 1,0$ град/км, и водородно-гелиевая атмосфера с соотношением $m_{He}/m_{H_2} = 1$, т. е. в 2 раза больше космической распространенности, для которой $\beta_a = 1,1$ град/км. Расчеты показали, что указанным изменением моделей согласовать расчет с экспериментом не представляется возможным. Поэтому объяснить радиоизлучение Урана в рамках поглощения только в водороде не представляется возможным. Необходимо наличие еще какой-то компоненты, поглощающей с.в.ч. излучение, коэффициент поглощения которой более слабо зависит от длины волны или относительная концентрация которой увеличится вглубь атмосферы. Такой компонентой может быть аммиак в состоянии насыщения. Водородно-аммиачная модель (¹²) действительно хорошо согласуется с экспериментом. Наличие в атмосфере дополнительного поглощающего агента увеличивает общее поглощение, поэтому для согласия с экспериментом на волне 0,34 см поглощение в водороде должно быть меньше приведенной оценки для чисто водородной атмосферы. Поэтому величины χ_0 , приведенные в табл. 1, являются верхним пределом коэффициента поглощения.

Таким образом, использование радиоастрономических измерений Урана дало возможность снизить верхний предел поглощения с.в.ч. излучения в водороде на 2—2,5 порядка по сравнению с лабораторными измерениями.

Расчет спектра радиоизлучения Урана для чисто водородной атмосферы с коэффициентом поглощения, равным верхнему пределу, определенному Бирнбаумом и Мариоттом (³), результаты которого приведены на рис. 1, показывает, что величина коэффициента поглощения по Бирнбауму и Мариотту действительно слишком велика для согласия с радиоастрономическими измерениями Урана.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР
Москва

Поступило
7 V 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. A. Maryott, G. Birnbaum, J. Chem. Phys., **36**, 2026 (1962). ² W. Ho, I. A. Kaufman, P. Thaddens, J. Geophys. Res., **71**, 5091 (1966). ³ G. Birnbaum, A. A. Maryott, J. Chem. Phys., **36**, 2032 (1962). ⁴ E. Epstein, Докл. на XIV съезде Международн. астрономич. Союза, Брайтон, 1970. ⁵ I. I. Pauliny-Toth, K. I. Kellerman, Astrophys. Letters, **6**, 185 (1970). ⁶ А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, А. Г. Соловьев, Препринт ФИАН № 65, 1970; Докл. на XIV съезде Международн. астрономич. Союза, Брайтон, 1970; Астрон. вестн., **5**, 23 (1971). ⁷ G. Berge, Publ. Astron. Soc. Pacific., **79**, 428 (1967). ⁸ M. J. Klein, T. V. Seling, Astrophys. J., **146**, 599 (1966). ⁹ K. I. Kellerman, Icarus, **5**, 478 (1966). ¹⁰ E. Gerard, Astron. and Astrophys., **2**, 246 (1969). ¹¹ В. Г. Тейфель, Г. А. Харитонов, Астрон. журн., **46**, 1104 (1969). ¹² А. Д. Кузьмин, ДАН, **196**, 66 (1971).