

ЗАВИСИМОСТЬ СВЕРХТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ВОДОРОДА
ОТ ДАВЛЕНИЯ

С. И. Урбанович

Получены положительный и отрицательный линейные сдвиги сверхтонкой структуры основного состояния атомного водорода в зависимости от природы и давления буферных газов. Найдено аналитическое выражение и численное значение величины «чисто» квадратичного сдвига сверхтонкой структуры в системах газов разной природы и в системах, образуемых равноименными зарядами. Указаны классы веществ с «чисто» квадратичным сдвигом сверхтонкой структуры. Дана интерпретация опытов Рамзи с водородным мазером. Согласно с экспериментальными данными полное.

Прецизионные измерения зависимости сверхтонкого интервала основного состояния атома водорода от давления окружающего газа, выполненные в последние годы [1-4], свидетельствуют о недостаточности знаний межатомных взаимодействий.

Одной из наиболее важных и пока не решенных проблем является объяснение увеличения сверхтонкого интервала основного состояния атома водорода по мере роста давления в буферных газах He и Ne и, наоборот, уменьшения сверхтонкого интервала в атмосферах Ar, Kr, Xe, H₂.

Поскольку волновые функции He известны, то в случае системы HeH существует возможность найти хотя бы приближенно коэффициент при линейном члене в зависимости сверхтонкого интервала водорода от давления гелия. Коэффициенты при линейном члене в системе HeH были найдены в работах [5-7].

Однако из-за нарастания вычислительных трудностей расчеты, аналогичные выполненным в работах [5-8], не были распространены даже на систему HeH, ближайшую к системе HeH.

Вскоре, однако, Т. Дэс, И. Икенберри [9] обратили внимание на то, что решение системы HeH неудовлетворительно, поскольку оно оставляет без какого-либо рассмотрения не только положительные сдвиги в системе HeH, но и большие отрицательные сдвиги в системах других инертных газов и молекул.

Тем не менее и после появления работы [9] продолжались усилия, направленные на решение проблемы HeH [8, 10] в отрыве от связи ее с проблемами других атомных и молекулярных систем, содержащих водород или его изотопы.

Тем временем была неопровержимо установлена зависимость сверхтонкого интервала основного состояния атома водорода от электрического поля в опытах с водородным мазером [11, 12]. Поскольку межатомные взаимодействия имеют электромагнитную природу, то заранее можно ожидать наличие связи между сдвигом сверхтонкого интервала водорода в газах и электрических полях. Однако сдвиг сверхтонкой структуры атома водорода в электрическом поле рассматривается сейчас вне такой связи [13, 14].

Целью настоящего сообщения является получение зависимости сверхтонкого интервала атомного водорода в зависимости от величины электри-

ческого поля и давления окружающих газов. Кроме того, ставится цель указать классы веществ, где можно ожидать новых явлений.

Если атом водорода находится в реальной газовой среде, то на электромагнитное взаимодействие между протоном и электроном накладывается межатомное (межмолекулярное) поле, которое можно заменить, согласно теореме Геллмана—Фейнмана, системой положительных зарядов в случае уменьшения сверхтонкого интервала [15]. Таким же образом при увеличении сверхтонкого интервала можно ввести эффективную систему отрицательных зарядов.

Повторяя выкладки работы [16], находим соответственно для первого и второго вариантов

$$\nu = \nu_0 (1 - DP), \quad (1)$$

$$\nu = \nu_0 (1 + DP). \quad (2)$$

ν_0 и ν — величины сверхтонкого интервала в вакууме и газе, P — давление газа, D — величина, выражаемая через параметры 6—12 Леннарда—Джонса и легко вычисляемая (подробнее см. [15, 16]).

Полученные линейные зависимости (1), (2) отражают данные, найденные в прецизионных экспериментах [1-4]. С другой стороны, выражения (1), (2) показывают, что инертные газы не являются буквально инертными, а существенно различаются между собой межатомными полями и сродством к водороду.

Сравнивая (1), (2) с имеющимися экспериментальными данными, находим, что атом H притягивается к Ar, Kr, Xe и молекуле H_2 и возможно образование ассоциаций или соединений с ними.

В то же время электронные конфигурации систем HeH и NeH имеют отталкивательный характер. Это согласуется с данными работ [6, 17] об отталкивательном характере потенциала HeH, а также находит подтверждение в том, что атомный водород не осаждается на поверхности неона [18] и не имеет устойчивых положений в решетке твердого Ne.

Поскольку одни вещества понижают сверхтонкий интервал, другие, наоборот, повышают, то возникает вопрос о поведении сверхтонкой структуры в смеси таких веществ.

Суммарное смещение сверхтонкой структуры в газовой смеси будет определяться суммой парциальных вкладов каждой компоненты [19]

$$\delta\nu = \sum_{i=1}^n \delta\nu_i = \nu_0 \sum_{i=1}^n D_i P_i. \quad (3)$$

Здесь $\delta\nu_i$ — относительное смещение в i -м газе, D_i — значение параметра для i -го газа, находящегося под P_i парциальным давлением.

Наложим, кроме того, условие

$$E = D_1 P_1 = -D_2 P_2. \quad (4)$$

Суммируя сдвиг частот сверхтонкого интервала, согласно (3), имеем для двухкомпонентных смесей

$$-\delta\nu = -\delta\nu_1 - \delta\nu_2 = -6 \left(\frac{1.5a^2}{e} \right)^2 E^2 \nu_0 = -CP^2. \quad (5)$$

Ограничиваясь двухкомпонентными смесями и используя данные работы [2], можно найти, что в следующих смесях будет отсутствовать линейное смещение сверхтонкой структуры водорода в зависимости от давления и, следовательно, можно ожидать «чисто квадратичного» хода зависимости уровней сверхтонкой структуры относительно атома H: 50% He—50% Ar; 62% Ne—38% Ar и т. д. Непосредственно из выражения (5) следует, что системы зарядов, равных по величине, но противоположных по знаку, вызывают квадратичное смещение по полю. В частности, такими системами являются HeAr или равное число разноименных зарядов в одинаковом объеме. Систему одинаковых по плотности разноименных зарядов можно создать между двумя обкладками конденсатора.

Наличие газа между ними благоприятствует созданию перемешанных разноименных объемных зарядов одинаковой плотности [20].

Помещая атом водорода в систему разноименных зарядов с общим полем E , находим, согласно (5), квадратичную зависимость сверхтонкой структуры от поля $-\delta\nu = -6(1.5a^2/e)^2 E^2 \nu_0 = -6.6 \cdot 10^{-5} E^2$, что превосходно согласуется с данными обоих прецизионных экспериментов [11, 12].

Значения «чисто квадратичного» сдвига сверхтонкой структуры в электрических полях для трития, дейтерия, мюония и позитрония соответственно, рассчитанные по предложенной процедуре, равны $-\delta\nu_T = -7.2 \cdot 10^{-5} E^2$, $-\delta\nu_D = -1.4 \cdot 10^{25} E^2$, $-\delta\nu_{\text{ми}} = -20.6 \cdot 10^{-5} E^2$, $-\delta\nu_{\text{Ps}} = -0.15 E^2$ в системе CGSE.

Поскольку величина и характер сдвига сверхтонкой структуры определяются не только величиной поля, но и природой (знаком) системы зарядов, то проявление линейного или квадратичного сдвигов зависит от соотношения между плотностями положительных и отрицательных зарядов, а величины сдвигов — от концентраций зарядов.

Литература

- [1] L. W. Anderson, F. M. Pipkin, J. C. Baird. *Phys. Rev.*, 120, 1279, 1960; 121, 1984, 1961; 122, 1962, 1961.
- [2] F. M. Pipkin, R. H. Lambert. *Phys. Rev.*, 127, 787, 1962.
- [3] R. A. Brown, F. M. Pipkin. *Phys. Rev.*, 174, 48, 1968.
- [4] L. C. Bailing, R. H. Lambert, J. J. Wright, R. Weiss. *Phys. Rev. Lett.*, 22, 161, 1969; *Phys. Rev.*, A7, 4018, 1970.
- [5] G. A. Clarke. *J. Chem. Phys.*, 36, 2211, 1962.
- [6] T. Das, S. Ray. *Phys. Rev. Lett.*, 24, 1391, 1970.
- [7] W. D. Davison, J. C. Liew. *J. Phys.*, B5, 309, 1972.
- [8] F. Masnou-Seewns. *J. Phys.*, B3, 1437, 1970.
- [9] T. Das, D. Ikenberry. *Phys. Rev. Lett.*, 27, 79, 1971.
- [10] А. А. Румянцев. *ЖЭТФ*, 65, 926, 1973.
- [11] E. N. Fortson, D. Kleppner, N. F. Ramsey. *Phys. Rev. Lett.*, 13, 22, 1964.
- [12] P. G. Gibbons, N. F. Ramsey. *Phys. Rev.*, A5, 73, 1972.
- [13] P. G. Sanders. *Proc. Phys. Soc.*, 92, 857, 1967.
- [14] N. Manakov, L. Rappoport, L. Zaprugaev. *Phys. Lett.*, A48, 145, 1974.
- [15] Д. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. *Молекулярная теория газов и жидкостей*, 716. М., 1961.
- [16] С. И. Урбанович. *ЖЭТФ*, 58, 641, 1970.
- [17] C. F. Barnett, I. A. Ray. *Phys. Rev.*, A5, 2120, 1972.
- [18] N. Foner, E. L. Cochran, V. A. Bowers, C. K. Jen. *J. Chem. Phys.*, 32, 963, 1960.
- [19] M. Arditi, T. Carver. *Phys. Rev.*, 112, 449, 1958.
- [20] Д. А. Чалмерс. *Атмосферное электричество*, 36. Л., 1974.

Поступило в Редакцию 5 апреля 1976 г.