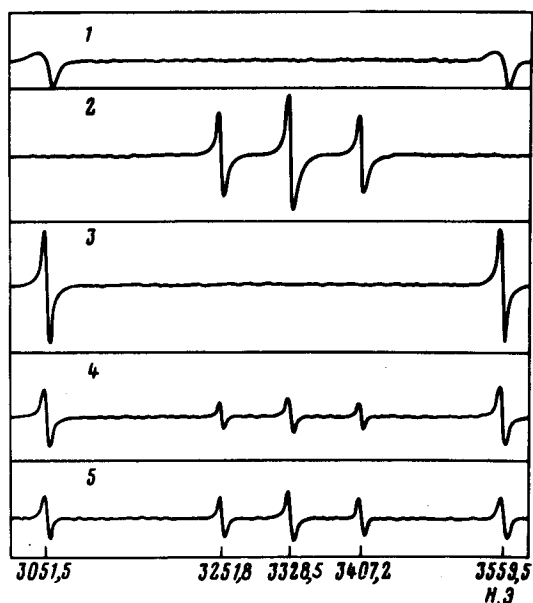


АТОМЫ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ КОНДЕНСАЦИЕЙ АТОМНОГО ПУЧКА В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

Е.Б.Гордон, А.А.Пельменев, О.Ф.Пугачев, В.В.Хмеленко

Конденсацией атомного пучка в сверхтекучий гелий достигнуты концентрации атомов Н и D, стабилизированных в молекулярной матрице, до $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Обнаружено превращение атомов D в атомы Н, свидетельствующее о протекании туннельных химических реакций обмена между атомом и молекулой изотопов водорода.

Атомы водорода являются атомами, для которых наиболее сильно должны проявляться коллективные квантовые эффекты. Поэтому проблеме накопления больших концентраций Н (n_{H}) при низких температурах уделяется сейчас пристальное внимание. Существенным успехом являются работы по стабилизации в газовой фазе ориентированных по спину в сильных магнитных полях атомов Н ($B \cong 11 \text{ Т}$ при $T \lesssim 0,3 \text{ К}$)¹. Однако, сейчас достигнуты лишь концентрации 10^{17} см^{-3} и из-за ряда причин трудно ожидать существенного их увеличения.



Спектры ЭПР атомов Н и D для различных смесей: 1 - $\text{H}_2 : \text{Ne} : \text{He} = 1 : 1 : 40$; 2 - $\text{D}_2 : \text{He} = 1 : 20$; 3 - $\text{H}_2 : \text{D}_2 : \text{Ne} : \text{He} = 1 : 1 : 1 : 60$; 4 - $\text{H}_2 : \text{D}_2 : \text{He} = 1 : 4 : 100$; 5 - $\text{H}_2 : \text{D}_2 : \text{He} = 1 : 10 : 220$

Для более традиционного способа стабилизации атомов водорода в твердой молекулярной матрице важнейшим фактором, ограничивающим n_{H} на уровне 10^{18} см^{-3} , является неустойчивость образца конечных размеров по отношению к тепловому взрыву, инициированному медленной „темновой” рекомбинацией атомов ². Поэтому при намораживании атомов Н из газа на холодную поверхность можно исследовать лишь эффекты типа квантовой диффузии атомов ³.

С этой точки зрения большими преимуществами обладает развитый нами для атомов азота методический подход, основанный на конденсации атомного пучка введением его в сверхтекучий гелий ⁴: благодаря предварительному охлаждению пучка до $T \lesssim 10 \text{ К}$ устраняется контакт „теплых” атомов с конденсатом, а высокая дисперсность конденсата (диаметр частиц $\sim 10^{-4} \text{ см}$) в сочетании с аномально высокой теплопроводностью He II сдвигают условия возникновения теплового взрыва в область более высоких n_{H} .

В описанных в настоящем сообщении экспериментах атомы водорода и дейтерия из зоны ВЧ разряда направлялись в виде пучка на поверхность HeII, наполнявшего стакан специальной формы. Атомы, достигшие дна стакана, регистрировались методом ЭПР с помощью специально созданной приставки ⁵. Температура He II при конденсации была 1,8 К.

Спектр ЭПР атомов Н (1), показанный на рисунке (исходная смесь $\text{H}_2 : \text{Ne} : \text{He} = 1:1:40$, неон добавлялся для того, чтобы конденсат, содержащий атомы Н, тонул в жидком He), представлял собой, в согласии с ⁶, характерный дублет искаженных широких линий с расщеплением 508 Э и g -фактором, равным 2,002. Спектр атомов D (2) имел обычный вид (расщепления 76,7 и 78,7 Э, соответственно, ширины линий 5,8 Э). Характерно, однако, что спектр атомов Н был насыщен даже при СВЧ мощности 1 мкВт, а для атомов D насыщения не проявлялось даже при мощности 100 мкВт.

В согласии с ³, атомы Н были существенно менее стабильны, чем атомы D. При отогреве ($3 \cdot 10^3 \text{ К/с}$) атомы Н уже не наблюдались при $T > 2,55 \text{ К}$; а в ряде случаев в момент перехода λ -точки ($T = 2,19 \text{ К}$) происходило резкое уменьшение ЭПР сигнала, подтверждающее высказанное нами ² представление о возможности для систем, содержащих атомы, теплового взрыва при переходе λ -точки. Выдержка при $T = 1,8 \text{ К}$ в течение $3 \cdot 10^3 \text{ с}$ приводила к уменьшению n_{H} в 2 – 3 раза. Подобная же экспозиция атомов D не меняла величины сигнала. Более того, n_{D} не изменялась заметно даже при выдержке образца при $T = 4,2 \text{ К}$ в течение 10^4 с . Примесь неона в исходной смеси не влияла ни на какие характеристики ЭПР сигнала атомов D.

Ввиду указанных различий представляло большой интерес исследовать смеси, содержащие одновременно водород и дейтерий (см. рис. 1). Удивительным образом оказалось, что а — для исходных смесей состава $H_2 : D_2 = 1 : 1$ сигнал атомов D отсутствует, а сигнал атомов H перестает насыщаться; б — даже при содержании $H_2 : D_2 = 1 : 10$ $n_H = 0,6 n_D$; в — атомы H в матрицах, содержащих дейтерий, были почти так же стабильны, как и атомы D , по отношению к изотермической выдержке и разогреву.

Поскольку нет сомнений в том, что в ВЧ разряде выходы атомов H и D приблизительно пропорциональны парциальным концентрациям H_2 и D_2 в исходной смеси, соответственно, существенно большие концентрации стабилизированных атомов H в дейтериево-водородных смесях говорят о том, что даже при низких температурах большая часть атомов D превращается в атомы H в химических реакциях обмена атома с молекулой. Действительно, туннельный канал в таких реакциях весьма заметен (оценка скорости туннельных реакций $H + H_2$ и $D + H_2$ по данным расчета⁷ и величине барьера для диффузии атомов $E = 30 \div 100$ К дает при $T \rightarrow 0$ величину $1 \div 10^4$ с⁻¹), но проявляться он может лишь для тех из них, в которых атом H превращается в атом H , а атом D — в атом D , и в атом H (другие из-за разницы в величине нулевых колебаний исходной молекулы и молекулы-продукта эндотермичны на $5 - 10$ кДж/моль). В результате этих процессов и обычной квантовой диффузии исходные и образовавшиеся атомы H мигрируют по матрице, пока не попадают в дейтериевую „шубу”, стабилизирующую их по отношению к перемещениям и, соответственно, к рекомбинации.

Тот факт, что характерное время жизни атомов H в молекулярной матрице, τ_H , при $T \cong \cong 2,55$ К в наших экспериментах менее 10^2 с (в³ при этих температурах $\tau_H \cong 10^4$ с), говорит о том, что достигнутые нами концентрации n_H гораздо выше, чем в³. Оценки, сделанные на основе калориметрических измерений величины потока, конденсирующегося в $He II$, дают следующие значения для смесей 1 — 5 (рисунок): 1 — $[H]/[H_2] + [Ne] = 0,1\%$; 2 — $[D]/[D_2] = 0,6\%$; 3 — $[H]/[H_2] + [D_2] + [Ne] = 0,4\%$; 4 — $[H]/[H_2] + [D_2] = 0,15\%$; $[D]/[H_2] + [D_2] = 0,22\%$; 5 — $[H]/[H_2] + [D_2] = 0,04\%$; $[D]/[H_2] + [D_2] = 0,065\%$.

Авторы благодарны М.Я.Овчинниковой за полезные обсуждения.

Литература

1. Silvera I.F., Walraven J.T. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 164.
2. Гордон Е.Б., Межов-Деглин Л.П., Пугачев О.Ф., Хмеленко В.В. ЖЭТФ, 1977, 72, 952.
3. Катунин А.Я., Лукашевич И.И., и др. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 375.
4. Гордон Е.Б., Межов-Деглин Л.П., Пугачев О.Ф. Письма в ЖЭТФ, 1974, 19, 103.
5. Гордон Е.Б., Пельменев А.А., Пугачев О.Ф., Хмеленко В.В. ФНТ, 1982, 8, 601.
6. Jen C.K., Foner S.N., Cochran E.L., Bowers V.A. Phys. Rev. 1958, 112, 1169.
7. George T.F., Miller W.H. J.Chem. Phys., 1972, 57, 2458.