

К ТЕОРИИ ДИФФУЗИИ НЕЙТРОНОВ В ЖИДКОМ ВОДОРОДЕ

А. В. Антонов, А. И. Исаков, О. А. Лангер

УДК 539.125.52

Исследован вопрос о нестационарной диффузии нейтронов в жидком водороде с термодинамически неравновесным содержанием ортофазы. Найден спектр нейтронов и рассчитаны параметры диффузии для различных концентраций ортофазы.

Диффузия нейтронов в жидком водороде представляет интерес как с прикладной точки зрения, в связи с проблемами получения интенсивных пучков холодных нейтронов, так и с чисто теоретической — особенно в случае термодинамически неравновесной смеси орто- и параводорода. Экспериментальному исследованию этого процесса посвящены работы /1-4/, в которых было показано, что при концентрациях ортофазы больше 10% нейтроны не приходят в термодинамическое равновесие со средой. При этом "эффективная температура" нейтронов в 1,5-2 раза превышает температуру среды. Тот факт, что спектр нейтронов в такой среде априори неизвестен, существенно усложняет теоретический анализ этого явления, и работы /2,3/, рассматривавшие данный вопрос, носили слишком грубый характер. Более тщательному теоретическому рассмотрению этих результатов посвящена настоящая работа.

При рассмотрении диффузии в жидком водороде существенную роль при рассеянии нейтронов играет эффект корреляции спинов протонов. Энергия вращательных состояний свободной молекулы водорода, как известно, имеет следующий вид:

$$E_J = (\hbar^2/ma^2)J(J + 1) = 0,015J(J + 1)/2 \text{ эВ,}$$

где J - вращательное квантовое число ($J = 0, 1, \dots$), m - масса протона, a - расстояние между протонами ($a = 0,75 \text{ \AA}$). Четные значения квантового числа J соответствуют парасостоянию, нечетные - орто; наименьшее вращательное состояние в случае параводорода $J = 0$, а ортоводорода - $J = 1$. Отношение орто- и парафаз в водороде при термодинамическом равновесии (пропорциональное отношению их статистических весов) должно быть 3:1 при достаточно высоких температурах. При понижении температуры появляется тенденция к переходу молекул водорода в парасостояние, и при 20 К почти все молекулы (99,8%) находятся в этом наименьшем вращательном состоянии. Поскольку скорость переноса орто-параводород очень мала, можно исследовать перенос нейтронов в жидком водороде с термодинамически неравновесным содержанием орто- и парафазы. При этом "равновесный" спектр нейтронов, формирующийся в такой среде, будет отличаться от максвелловского.

Для рассмотрения этого своеобразного явления воспользуемся уравнением баланса нейтронов в форме

$$\partial N / \partial t = - w_{\text{eff}}(E) N + \int_0^{\infty} dE' N(E', t) w(E' \rightarrow E),$$

$$w_{\text{eff}} = v \Sigma_S(E) + v \Sigma_C(E) + D(E) E^2, \quad (I)$$

$$\Sigma_S(E) = \int_0^{\infty} dE' \Sigma_S(E \rightarrow E'),$$

$$w(E \rightarrow E') = v \Sigma_S(E \rightarrow E'),$$

где $N(E, t)$ - плотность нейтронов, имеющих энергию E , в момент времени t , Σ_S и Σ_C - макроскопические сечения рассеяния и поглощения, $D(E)$ - коэффициент диффузии нейтронов, E^2 - геометрический параметр. При больших временах устанавливается асимптотический квазиравновесный спектр нейтронов $N_0(E)$, и плотность нейтронов убывает со временем экспоненциально с постоянной затухания λ : $N(E, t) = N_0(E) \exp(-\lambda t)$. Отсюда получаем уравнение для $N_0(E)$.

$$[w_{\text{eff}} - \lambda] N_0(E) = \int_0^{\infty} dE' N_0(E') w(E' \rightarrow E). \quad (2)$$

Для простоты рассмотрим случай безграничной однородной среды, т.е. $B^2 = 0$. Если водород не находится в термодинамическом равновесии, ядро этого уравнения $w(E' \rightarrow E)$ не удовлетворяет условию детального равновесия. Представим его в виде:

$$w(E' \rightarrow E) = w_M(E' \rightarrow E) + w'(E' \rightarrow E).$$

Здесь $w_M(E' \rightarrow E)$ удовлетворяет принципу детального баланса

$$M(E) w_M(E \rightarrow E') = M(E') w_M(E' \rightarrow E), \quad (3)$$

где $M(E)$ — максвелловское распределение, соответствующее температуре T ,

$$M(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{T} \sqrt{E} e^{-E/T},$$

а $w'(E' \rightarrow E)$ — немасвелловская добавка, обусловленная рассеянием нейтронов, сопровождающимся переходом молекулы из орто- в парасостояние. Из оценок для газообразного молекулярного водорода (см. ниже) следует, что $w'(E' \rightarrow E)$ мало по сравнению с $w_M(E' \rightarrow E)$. Поэтому решение уравнения (2) можно искать в виде

$$N_0(E) = M(E) + n(E), \quad (4)$$

где $n(E)$ — малая добавка. Тогда, подставляя (4) в (2) и учитывая (3), а также, тот факт, что $\lambda = \nu \Sigma_c(E)$, получим для $n(E)$ уравнение

$$\nu \Sigma_s(E) n(E) = \int_0^{\infty} dE' n(E') w_M(E' \rightarrow E) + S(E), \quad (5)$$

$$S(E) = \int_0^{\infty} dE' M(E') w'(E' \rightarrow E). \quad (6)$$

Таким образом, мы получили обычное уравнение для замедления нейтронов в безграничной однородной непоглощающей среде с источником $S(E)$, обусловленным нагреванием максвелловских нейтронов при рассеянии, сопровождающемся орто-пара переходами. Поскольку температура жидкого водорода ($\approx 0,00172$ эВ) много меньше средней энергии Δ , приобретаемой нейтроном при таких переходах ($\Delta \approx 0,010$ эВ), $S(E)$ приближенно можно заменить δ -функцией:

$$S(E) = A\delta(E - \Delta), \quad (7)$$

$$A = \iint M(E'')w'(E'' \rightarrow E)\delta E' dE''. \quad (8)$$

Более точно (чтобы учесть размытость источника) можно положить

$$S(E) = AM(E - \Delta).$$

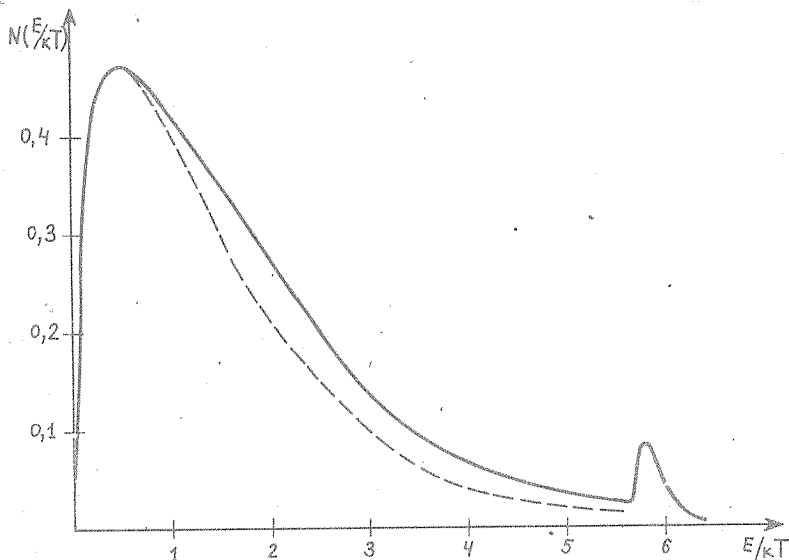
Тогда в области энергий $\Delta > E \gg T$ решением уравнения (5) является хорошо известный так называемый фермиевский спектр замедляющихся нейтронов от источника $S(E)$ и

$$n(E) = A/w(E)E\xi + S(E)/w(E), \quad (9)$$

где ξ — средняя логарифмическая потеря энергии при одном соударении (для молекулы водорода $\xi = 0,725$). Полученный спектр $N_0(E)$ приведен на рис. 1.

При расчете $n(E)$ необходимо знать соответствующие сечения рассеяния нейтронов в жидком водороде, для определения которых в настоящее время нет надежных данных. Однако, как показано в работе /6/, в случае, например, параводорода при малых энергиях нейтронов удастся получить удовлетворительное описание сечения рассеяния, считая молекулу водорода свободной. Поэтому для оценок воспользуемся этим допущением. Отметим, что сравнение таких расчетов с экспериментом позволит независимо оценить роль межмолекулярных сил в жидком водороде.

Молекула водорода является одной из самых простых молекулярных систем. Для нее могут быть достаточно точно вычислены элементы матрицы рассеяния. (см., например, /5/), что позволяет деталь-



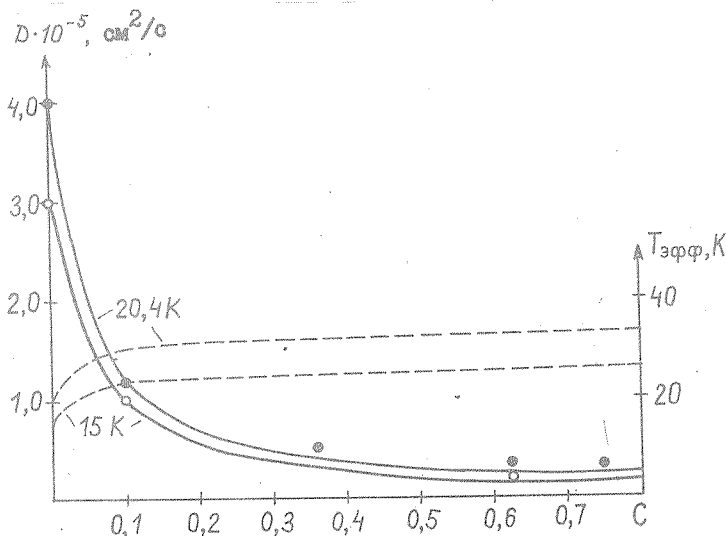
Р и с. I. Спектр нейтронов в жидком водороде при температуре 20,4 К с концентрацией ортофазы 75%; пунктирной линией показан максвелловский спектр

но рассмотреть обмен энергией между нейтроном и различными степенями свободы молекулы. В области интересующих нас энергий нейтронов такими степенями свободы являются только поступательное движение молекул и их вращение, причем возбуждаются только два нижних вращательных уровня ($J = 0$ и $J = 1$). Соответствующие микроскопические сечения $\sigma_{J \rightarrow J'}(E)$ для температуры 20 К рассчитаны в /5/ и равны

$$\sigma_{1 \rightarrow 0} = 1,753(a_1 - a_0)^2,$$

$$\sigma_{1 \rightarrow 1} = 6,450 \left[(3a_1 + a_0)^2 + 2(a_1 - a_0)^2 \right],$$

$$\sigma_{0 \rightarrow 0} = 6,444(3a_1 + a_0)^2,$$



Р и с. 2. Зависимость коэффициента диффузии D и эффективной температуры нейтронов $T_{\text{эфф}}$ (равной $2/3$ от средней энергии) от концентрации ортофазы C в жидком водороде: сплошная линия — расчетные значения D , \circ — экспериментальные данные для $20,4$ К, \bullet — экспериментальные данные для 15 К, пунктир — $T_{\text{эфф}}$

где $a_1 = 0,537 \cdot 10^{-12}$ см; $a_0 = -2,373 \cdot 10^{-12}$ см. Зная $\sigma_{j-j'}$ и полагая $\Lambda = v n_0 \sigma_{j-j'}$ (n_0 — плотность ортомолекул) можно рассчитать $n(E)$ и усреднить $D(E)$ и энергию нейтронов E по найденному спектру.

Результаты расчета коэффициента диффузии, а также средней энергии нейтронов в жидком водороде при температурах $20,4$ К и 15 К, в зависимости от концентрации ортофазы, приведены на рис. 2 и сравнены с экспериментом [2]. Видно, что несмотря на грубость расчета, результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Поступила в редакцию
12 июля 1982 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. В. Антонов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН № 10, 86 (1970).
2. А. В. Антонов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН № 1, 50 (1970).
3. Ю. А. Меркульев, диссертация ФИАН, М., 1972 г.
4. А. В. Антонов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН, № II, 32 (1977).
5. А. Ахизер, И. Померанчук, Некоторые вопросы теории ядра, Гостехиздат, М., 1950 г.
6. A. W. Mc Reynolds, W. L. Whittemore, Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids, IAEA, Vienna, 1963, v.I, p. 263.