

Ю. Н. Кузнецов

## УДАРНЫЕ ВОЛНЫ — КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ?

Эффекты, связанные с движением ядра атома, определяют инертные свойства атома в целом. Модель Бора, например, указывает на то, что движение электрона сопровождается движением ядра относительно центра инерции с той же самой частотой. Изменение энергии ядра (нуклона), связанное с малым изменением его импульса  $\Delta p = p_1 - p_0$ ,  $p = mv$ , можно представить, используя выражение  $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ , в виде  $\Delta E \approx \Delta p v$ .

При действии возмущения на ансамбль идентичных атомов, описываемых вектором состояния  $\psi(r)$ , физически наблюдаемая величина  $\langle E \rangle_{\text{ср}} = \langle \psi | \hat{H} | \psi \rangle$  определяет отклик ансамбля [1, 2]. Отклик атома, проявляющийся в том, что его центр инерции вовлекается в движение с определенной скоростью, обусловлен взаимодействием волновых функций валентных электронов и нуклонов [3—5], т. е. переносом импульса виртуальным фотоном, возникающим в результате взаимодействия пары атомов (квадрупольное взаимодействие), от электронного облака к кулоновскому центру. Причем в локальной системе центра инерции двух взаимодействующих атомов (двух диполей, индуцируемых инерцией, при определенной амплитуде возмущения), некомпенсированный момент количества движения  $\hbar$  [1], возникший в результате обмена виртуальным фотоном (рождения пары), переходит в относительное движение центров инерции атомов, наблюдаемое в лабораторной системе координат.

Переход атомной системы из одного стационарного состояния в другое носит резонансный характер [1, 2], поэтому  $\omega_{mn} = (V_m - V_n)/2\hbar$ , множитель 2 учитывает квадрупольный характер процесса, а величины  $V_m$ ,  $V_n$  — потенциалы, характеризующие взаимодействие волновых функций электрона и нуклона.

Проанализируем некоторые явления, происходящие при ударном нагружении вещества, исследуя отклик системы атомов на внешнее возмущение. Ударная адиабата в диапазоне в десятки гигапаскалей для многих веществ удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью  $D = c_0 + \lambda u$  ( $c_0$ ,  $\lambda$  — коэффициенты,  $u$  — массовая скорость,  $D$  — скорость фронта ударной волны) [6—8]. Фазовая скорость распространения возмущения в атомном ансамбле лимитируется прежде всего инертными свойствами ядер атомов. Отклик атома, проявляющийся в том, что его центр инерции вовлекается в движение с массовой скоростью  $u$ , обусловлен электрон-нуклонным взаимодействием.

Рассмотрим однородный металл, находящийся в основном состоянии. Принимаем, что атомная ячейка (Вигнера — Зейтца [9]) характеризуется следующими средними величинами: энергией основного состояния атома, представленной псевдопотенциалом  $\bar{V}_0$ , который описывает взаимодействие валентных электронов с атомным остатком (электрон-нуклонное взаимодействие) и определяет «жесткость» ячейки, половина от этой энергии представлена (по аналогии со схемой Вигнера — Зейтца [9]) суммой энергий ионизации  $I_0$  и связи  $\Delta V_0$  (значение энергии ионизации  $I_0$  отличается от табличной величины, определяемой стандартными методами, так как волновые функции атомного электрона внутри металла вследствие его «коллективизации» деформированы). Оценим вклад каждого из этих факторов в фазовую скорость распространения возмущения —  $D$ .

Основной вклад в функцию отклика атомной системы вносит псевдопотенциал  $\bar{V}_0$ , определяющий соотношение между энергией (нулевой энергией [1, 2]) и инерцией, представленной импульсом ядра, а  $I_0$  и

$\Delta\bar{V}_0$  описывают парные взаимодействия атомов, распределение потенциала между «внутренними» степенями свободы. С учетом соображений, развиваемых выше, сформируем соотношение

$$\bar{v} = (\bar{V}_0/2m)^{1/2} + (\bar{I}_0/\Delta\bar{V}_0)\Delta\bar{u}$$

или

$$\bar{v} = \bar{v}_0 + a\Delta\bar{u}.$$

Приняв  $u \approx \Delta\bar{u}$ ,  $a \approx \lambda$ ,  $\bar{v}_0 \approx c_0$ , получим

$$\bar{V}_0 \approx 2(\Delta\bar{V}_0\lambda + \Delta\bar{V}_0), \bar{V}_0 \approx 2mc_0^2.$$

Амплитуду  $\Delta p$ , соответствующую переходу атомной системы из одного стационарного состояния в другое для малых неадиабатических возмущений [1, 2], можно оценить из условий квантования квазипульса  $\Delta p = m\Delta u_0$ ,  $m\Delta u_0 = \hbar/2a$  ( $a \approx 2r$ ,  $a$  — межатомное расстояние,  $r$  — условный атомный радиус). Величина  $\Delta u_0$  указывает на одну из возможных особенностей в функции отклика атомного ансамбля, а именно, на дискретный характер движения, связанный с законом сохранения момента количества движения [1], т. е. движение, возникающее в ответ на неадиабатическое возмущение, квантовано. В ряде случаев эта особенность фиксируется и, по-видимому, она определенным образом связана с амплитудой упругого предвестника  $u_{el}$  (для реальных металлов  $u_{el}$  зависит от расстояния от поверхности нагружения, кристаллографического направления, параметров поверхности Ферми). Возможно,  $u_{el} = n\Delta u_0$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ . В таблице приведены результаты оценок  $u_0$  по величине

Элементы	$m \cdot 10^{-26}$ , кг	$c_0, v_0 \cdot 10^3$ , м/с [8]**	$\lambda$ [8]	$r \cdot 10^{-10}$ , м [10]	$\Delta\bar{V}_0 \cdot 10^{-19}$ , Дж/ат [9]	$u_{el}, \Delta u_0$ , м/с [8]**
Be	4,494	7,990 8,7	1,124	1,25	5,33	25 89
Al	4,482	5,380 5,3	1,337	1,58	5,34	30 23
Ti*	7,950	5,220 4,2	0,767	1,61	7,76	— —
Fe	9,269	4,630 4,2	1,330	1,41	6,86	25 13
Cu	10,540	3,930 3,7	1,520	1,41	5,60	10 11
Mo*	15,920	5,100 4,1	1,266	1,55	10,90	— —
Ag*	17,900	3,170 2,8	1,657	1,60	4,74	— —
Ta*	30,040	3,430 3,1	1,198	1,63	12,94	— —
W*	30,540	4,020 3,2	1,252	1,55	13,92	— —
Au*	32,700	3,063 2,2	1,563	1,60	6,05	— —
Bi	34,690	1,826 1,6	1,473	2,03	3,44	3 2

\* Данные [6].

\*\* Первое число — эксперимент [8].

энергии связи на атом  $\Delta V_0$  и  $\Delta u_0$ , а также экспериментальные данные [6, 8].

По соотношению Ренкина — Гюгонио  $\Delta P_n = \rho_0 D u$  определим масштаб энергии  $\Delta E$ , при котором происходит неупругое взаимодействие. Пороговый масштаб энергии по результатам динамических экспериментов [8]:

$$2\Delta E_0 = \hbar\omega = 2m_0c^2 \approx mc_0\Delta u_0 \sim 10^{-20} \text{ Дж (0,1 эВ)}.$$

Таким образом, предложены модельные представления, позволяющие интерпретировать явления, происходящие при ускоренном движении масс с привлечением понятий квантовой механики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дирак П. Принципы квантовой механики.— М.: Мир, 1979.
2. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики.— М.: Наука, 1983.
3. Ферми Э. Научные труды.— М.: Наука, 1971.— Т. 1.
4. Марков М. А. Нейтрино.— М.: Наука, 1964.
5. Хриплович И. Б. Несохранение четности в атомных явлениях.— М.: Наука, 1988.
6. Альтшулер Л. В. и др. ПМТФ, 1984, 2, 3.
7. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
8. Swegle J. W., Grady D. E. J. Appl. Phys., 1985, 58, 106.
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела.— М.: Наука, 1978.
10. Регель А. Р., Глазов В. М. Периодический закон и физические свойства электронных расплавов.— М.: Наука, 1977.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 6/XII 1989