

ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ СВЕТА ИЗБЫТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

И.А. Фокин

Исследование механизма движения зарядов в жидком гелии показало, что избыточный электрон в нем образует вокруг себя полость радиусом около 20 \AA . Для электрона полость представляет собой потенциальную яму глубиной около $1,3 \text{ эв}$. В такой яме помещается несколько (~ 10) электронных уровней. Если пропустить через жидкий гелий с избыточными электронами в нем поток света, то можно наблюдать эффекты, связанные с переходами электронов между уровнями — поглощение резонансных частот и рассеяние. Некоторые соображения об оптических свойствах избыточных электронов в гелии уже высказывались [1]. В настоящем письме приведены результаты оценок величин этих эффектов.

Система "электрон внутри пузырька" во многом аналогична молекуле. Движению ядер здесь соответствуют деформации пузырька, их периоды гораздо больше, чем периоды электронных движений, поэтому можно

считать, что система электронных термов "следит" за изменением формы и размера пузырька. Каждому электронному состоянию соответствуют свои равновесные размер и форма пузырька, они находятся минимизацией энергии системы. Для оценки порядка величины частот деформационных колебаний пузырька был рассмотрен их простейший тип — сферически симметричные колебания. Когда электрон находится в основном состоянии, их частота $\Omega \approx 4 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$. При вычислении частот линий поглощения и величины поглощаемой энергии деформационные колебания пузырька можно не учитывать, т.е. считать, что переходы происходят в сферической яме с радиусом, соответствующим основному состоянию электрона. Учет деформаций пузырька необходим лишь при нахождении ширины линий.

Заметные эффекты возникают только из-за переходов между нижними уровнями, для этих уровней яму можно считать прямоугольной и бесконечно глубокой. Энергия n -го электронного состояния с моментом ℓ , отсчитанная от дна ямы (см. [2]): $E_{n\ell} = \hbar^2 \beta_{n\ell}^2 / 2ma^2$.

Здесь m — масса электрона, a — радиус ямы (для выбранной модели $a \approx 19 \text{ \AA}$), а $\beta_{n\ell}$ — n -й корень функции Бесселя порядка $\ell + 1/2$. Последовательность уровней в бесконечно глубокой яме такова $1s, 1p, 1d, 2s, 1f, 2p, 1g, 2d, 1h...$ Поглощение света может возникнуть из-за перехода электрона из основного состояния $1s$ в состояния с моментом $\ell = 1$, т.е. $1p, 2p$, другие переходы запрещены правилами отбора. Реально можно говорить лишь о переходе $1s \rightarrow 1p$, поскольку матричный элемент перехода в состояние $2p$ оказывается гораздо меньшим. Частота света, поглощаемого при переходе $1s \rightarrow 1p$ $\omega_{1p}^{1s} = (E_{1p} - E_{1s})/\hbar \approx 1,6 \cdot 10^{14} \text{ сек}^{-1}$, ей соответствует длина волны $\lambda = 12 \text{ мк}$. Это — инфракрасный диапазон.

Полная энергия, поглощаемая в единицу времени в расчете на один электрон при переходе из состояния a в состояние b , S находится по формуле [3]

$$S = \frac{4\pi^2 e^2}{3 \hbar e} |(r)_{ab}^a|^2 \omega_b^a I_0(\omega_b^a).$$

Здесь $\omega_b^a = (E_b - E_a)/\hbar$, $I_0(\omega)$ — спектральная плотность интенсивности падающего света, $e^2/\hbar e = 1/137$, а $(r)_{ab}^a$ — матричный элемент радиус-вектора электрона между начальным и конечным состояниями, он для выбранной модели легко вычисляется: $|(r)_{1p}^{1s}| \approx 0,53 a$. В системе CGS $S \approx 0,16 I_0(\omega_{1p}^{1s})$.

Предварительная оценка ширины линии γ дает для нее значение $\sim 10^{12}$. В основном, это температурное уширение из-за переходов с изменением радиуса пузырька. Коэффициент поглощения света в интервале частот γ около ω_{1p}^{1s} посторонними электронами в гелии определится тогда как $\nu S / I_0(\omega_{1p}^{1s}) \gamma$, через ν обозначена концентрация избыточных элект-

ронов. Он будет порядка 1% при концентрации 10^{11} см⁻³; таких концентраций, по-видимому, можно достичь при существующих радиоактивных источниках. Большая часть поглощенной энергии будет излучаться в виде резонансно рассеянного света.

На рассматриваемой системе возможно также комбинационное рассеяние. Наиболее интенсивной будет линия, соответствующая переходу $1s \rightarrow 1d$, при этом рассеянный свет смещается по частоте на $\omega_{1d}^{1s} \approx 3,8 \cdot 10^{14}$ сек⁻¹ в сторону меньших частот. Эффективное сечение комбинационного рассеяния света частоты ω на одном электроны $\sigma(\theta)$ вычисляется по общим формулам [4]. В нашем случае можно ограничиться учетом лишь одного промежуточного состояния $1p$, вклад остальных мал, тогда

$$\sigma(\theta) = \frac{(\omega + \omega_{1d}^{1s})}{2c^2} \left[\frac{\omega_{1p}^{1s} + \omega_{1p}^{1d}}{(\omega_{1p}^{1s} - \omega)(\omega_{1p}^{1d} + \omega)} \right]^2 \left(\frac{e^2}{\hbar c} \right)^2 a^4 \left[\left(\frac{r}{a} \right)_{1p}^{1s} \left(\frac{r}{a} \right)_{1d}^{1p} \right]^2 \frac{6 + \sin^2 \theta}{45}.$$

Здесь θ — угол между направлением падения света и направлением наблюдения, через r обозначена абсолютная величина радиус-вектора электрона, а матричные элементы берутся между радиальными частями соответствующих волновых функций, для них получаются такие значения $(r/a)_{1p}^{1s} \approx 0,53$, $(r/a)_{1d}^{1p} \approx 0,59$. Если источником света является рубиновый лазер, то $\sigma(\theta) \approx 2,5 \cdot 10^{-26} (6 + \sin^2 \theta) / 45$ см².

До сих пор мы предполагали, что температура гелия $1 + 2^\circ\text{K}$ и внешнее давление отсутствует. При приложении давления радиус пузырька будет уменьшаться, а частоты переходов увеличиваться. Под давлением 10 атм переходу $1s \rightarrow 1p$ соответствует частота $2,8 \cdot 10^{14}$ сек⁻¹ ($\lambda = 7 \mu$), а под давлением 20 атм $3,6 \cdot 10^{14}$ сек⁻¹ ($\lambda = 5 \mu$).

Автор признателен Л.П. Питаевскому за предложение рассмотреть затронутые в настоящем письме вопросы и за полезные обсуждения, а также А.И. Шальникову и И.И. Абрикосовой за обсуждение экспериментальных возможностей.

Московский
физико-технический
институт

Поступило в редакцию
11 июля 1967 г.

Литература

- [1] J. Jortner, N.R. Kestner, S.A. Rice, M.H. Cohen. J. Chem. Phys. 43, 2614, 1965.
[2] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика. М., 1963.

- [3] В. Гайтлер, Квантовая теория излучения (перевод). ИЛ, М., 1956.
- [4] Г. Плачек, Релеевское рассеяние и Раман-эффект (перевод).
ОНТИ, Харьков, 1935.