

## ОБЛАСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ НА ВЫСОКИХ ОБОЛОЧКАХ АТОМА

*И.М.Банд, Л.А.Слив, М.Б.Тржасковская*

Формулы для вычисления коэффициентов внутренней конверсии (КВК) в предположении сферической симметрии поля атома при электрических ( $\lambda \equiv E$ ) и магнитных ( $\lambda \equiv M$ ) переходах ядра мультипольности  $L$  имеют вид

$$\alpha^{\lambda L} = \pi k \alpha \sum_{\kappa} B_{\kappa \kappa'}^{\lambda L} |R_{\kappa}^{\lambda L}|^2. \quad (1)$$

Здесь  $k$  – энергия  $\gamma$ -кванта,  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры,  $\kappa = 1/2(\ell - j)(j + 1/2)$ . Индексы без штрихов относятся к электронам в свободном состоянии, со штрихами – в связанном.  $B_{\kappa \kappa'}^{\lambda L}$  вычисляются в конечном виде в результате интегрирования по угловым переменным. Будем рассматривать радиальные интегралы как функции верхнего предела  $r$

$$R_{\kappa}^{ML}(r) = \int_0^r h_L(kr) (F_{\kappa} G_{\kappa'} + G_{\kappa} F_{\kappa'}) dr, \quad (2)$$

$$R_{\kappa}^{EL}(r) = \int_0^r \{ h_{L-1}(kr) [(\kappa - \kappa') (G_{\kappa} F_{\kappa'} + F_{\kappa} G_{\kappa'}) + L(G_{\kappa} F_{\kappa'} - F_{\kappa} G_{\kappa'}) + L h_L(kr) (F_{\kappa} F_{\kappa'} + G_{\kappa} G_{\kappa'}) \} dr$$

$h_L(kr)$  – сферическая функция Ханкеля,  $G_{\kappa}$  и  $F_{\kappa}$  – "большая" и "малая" компоненты релятивистской радиальной волновой функции электрона, домноженные на  $r$ . (Мы используем релятивистскую систему единиц).

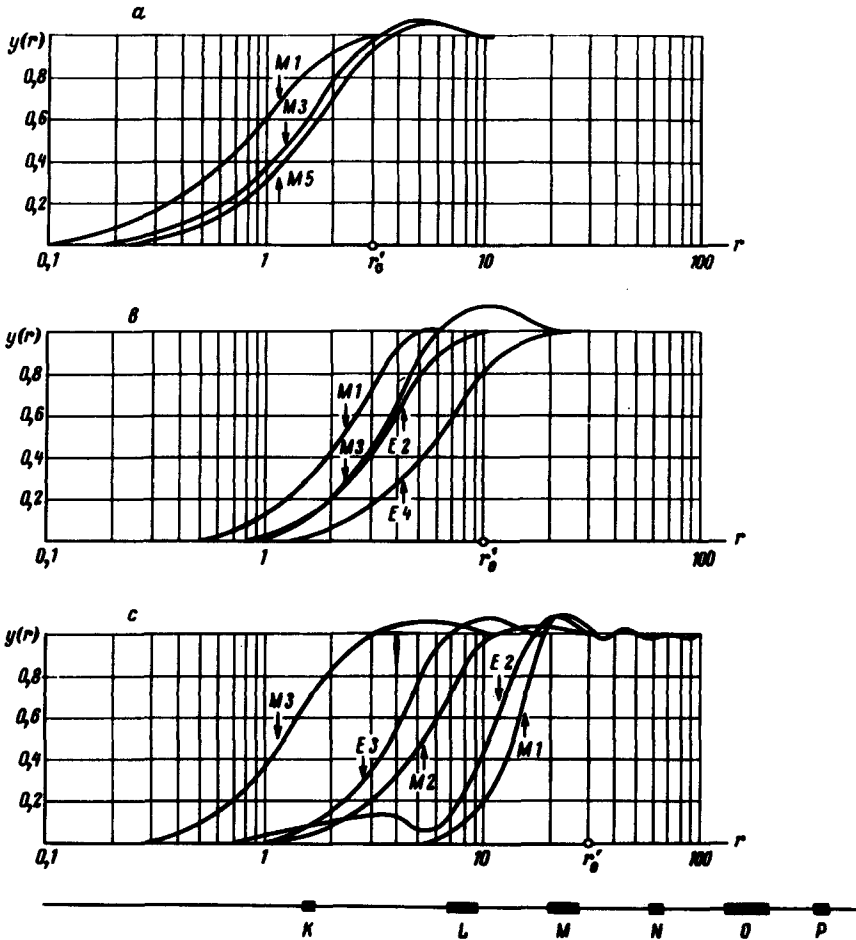
Принято считать, что радиус области, в которой формируется КВК, определяется характерными для данного процесса расстояниями  $1/k, 1/p, 1/p'$ , которые связаны с поведением подинтегральных функций в (2). ( $p = \sqrt{\epsilon^2 - 1}$ ,  $p' = \sqrt{1 - \epsilon'^2}$ ,  $\epsilon$  и  $\epsilon'$  – энергии свободного и связанного электронов). Из таких представлений следовало, что при малом импульсе конверсионного электрона и при большом  $N'$  – главном квантовом числе связанного электрона, КВК должны формироваться на периферии атома. Однако, при малых энергиях конверсионного электрона такие оценки неверны. Волновые функции электрона  $G_{\kappa}$  и  $F_{\kappa}$  являются решениями радиальных уравнений Дирака

$$\left. \begin{aligned} dG_{\kappa}/dr &= -(\kappa/r)G_{\kappa} + (\epsilon + 1 + \alpha Z \phi(r)/r) F_{\kappa} \\ dF_{\kappa}/dr &= (\kappa/r)F_{\kappa} - (\epsilon - 1 + \alpha Z \phi(r)/r) G_{\kappa} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

( $\phi(r)$  – функция экранирования), и при  $\epsilon$  близких к 1 поведение функций в ос-

новном определяется потенциальным членом  $aZ\phi/r$ . В результате, радиальные функции становятся знакопеременными на небольших  $r \approx (\ell + 1)(\ell + 2)/aZ$  расстояниях от центра атома. Положение первых нулей  $G_K$  и  $G_{K'}$  практически не зависит от  $1/\rho$  и  $1/\rho'$ .

Мы рассматривали функцию  $y(r) = a^{\lambda L}(r) / a^{\lambda L}(\infty)$  и интересовались такими расстояниями  $r_{эф}$  от центра атома, при которых  $y(r_{эф})$  достигает своего асимптотического значения, равного единице. Найдено, что  $r_{эф}$  (т. е. радиус области формирования КВК) меньше, чем расстояние от центра атома до первых нулей  $r'_0$  и  $r_0$  волновых функций электронов в связанном и свободном состояниях при тех  $\kappa$ , которые дают наибольший вклад в (1). Эту закономерность мы обнаружили и проверили конкретными вычислениями для всех оболочек ато-



мов с  $Z = 72, 30, 18$  и для ряда энергий конверсионных электронов  $\epsilon \gg 1,001 mc^2$ . Как правило,  $r_{эф} \leq r'_0$ . На рисунке воспроизведены  $y(r)$ , вычисленные для  $Z = 72, \epsilon = 1,01 mc^2$ . Функция  $y(r)$  мало зависят (в пределах 15%) от  $\epsilon$  при  $1,001 mc^2 \leq \epsilon \leq 1,1 mc^2$  и, поэтому все кривые практически относятся к любой энергии в этом промежутке. Каждая из кривых в случае a относится к  $K, L_I, M_I, N_I, O_I, P_I$  оболочкам, b -  $L_{II}, M_{II}, N_{II}, O_{II}$  и c -  $M_V$  и  $N_V$ .

Масштаб по оси абсцисс логарифмический. На нижней шкале приведены для сравнения положения главных максимумов соответствующих электронов. Знаком  $r_0'$  отмечено положение первого нуля функции  $G_K$  электрона в связанном состоянии. Рядом с кривыми указан тип перехода. Рисунки *a* – *c* иллюстрируют, что  $r_{\text{ЭФ}} \leq r_0'$ . Но рисунок *c* показывает, что и в случае конверсии на одной и той же оболочке атома, но при разных ядерных переходах,  $r_{\text{ЭФ}}$  значительно отличаются друг от друга. Это связано с положением первых нулей  $r_0$  волновых функций свободных электронов. Во всех приведенных на рисунке случаях  $r_{\text{ЭФ}} \leq \min(r_0', r_0)$ . Качественные оценки рассматриваемого явления, которые можно провести, перейдя к нерелятивистскому пределу для  $R_{\kappa}^{EL}$  и, воспользовавшись приближенной формулой В.Б. Берестецкого [1] для  $R_{\kappa}^{ML}$ , согласуются с нашими численными расчетами и выводами.

До сих пор мы интересовались отношениями  $\alpha^{\lambda L}(r)$  к  $\alpha^{\lambda L}(\infty)$  и выяснили, что они достигают своего асимптотического значения глубоко внутри атома. Последнее означает, что величина КВК формируется в этой области с точностью до множителей, определяемых обычными требованиями нормировки радиальных волновых функций. Электростатическое поле на периферии атома влияет на величину КВК лишь через нормирующие множители, квадраты которых пропорциональны плотностям электронов в нуле.

Из изложенного в настоящей работе можно сделать следующие выводы: 1) величина КВК на всех, в том числе валентных оболочках атома, формируется во внутренних слоях атома и, поэтому, с точностью до изменения электронной плотности в нуле, не зависит от тех или иных изменений электростатического поля на периферии атома; 2) измерение КВК на высоких атомных оболочках так же, как и на внутренних, может служить для определения спинов и четностей ядерных уровней; 3) КВК на высоких оболочках атома должны мало изменяться при изменении числа электронов на других оболочках и значительно – при изменении общего числа электронов на той оболочке, с которой происходит конверсия. Т. е. измерение КВК на высоких оболочках атома может служить для определения химического состояния атома. Эта идея высказывалась в ряде ранее опубликованных работ [2, 3], однако, только настоящее рассмотрение объясняет его причины; 4) измерение КВК можно использовать для определения плотности электронов в нуле [2, 3].

Авторы благодарны М.А. Листенгартену за плодотворные обсуждения.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
12 февраля 1970.

### Литература

- [1] В.Б. Берестецкий. ЖЭТФ, 18, 1057, 1948.
- [2] J.P. Vochet et al. Phys. Rev. Lett., 17, 809, 1966.
- [3] T.A. Carlson et al. Nucl. Phys., A111, 371, 1968.