

ВНУТРЕННЯ КОНВЕРСИЯ В ПОЛЕ "ЭЛЕКТРОННОГО МОСТИКА"

В.А.Крутов

Рассмотрен не исследованный до сих пор эффект внутренней конверсии в электромагнитном поле, создаваемом током "электронного мостика". Показано, что при малых энергиях ядерных переходов эффект может привести к изменению отношений коэффициентов внутренней конверсии (КВК) на высоких оболочках атомов.

Из эффектов высших приближений по $\alpha = e^2/\hbar c$ уникальным является эффект "электронного мостика" (далее ЭМ) ¹⁻⁴. Этот эффект заключается в дополнительной разрядке возбужденного ядра γ -излучением через электронную оболочку в качестве промежуточного состояния (см. диаграмму 3 на рисунке). Уникальность

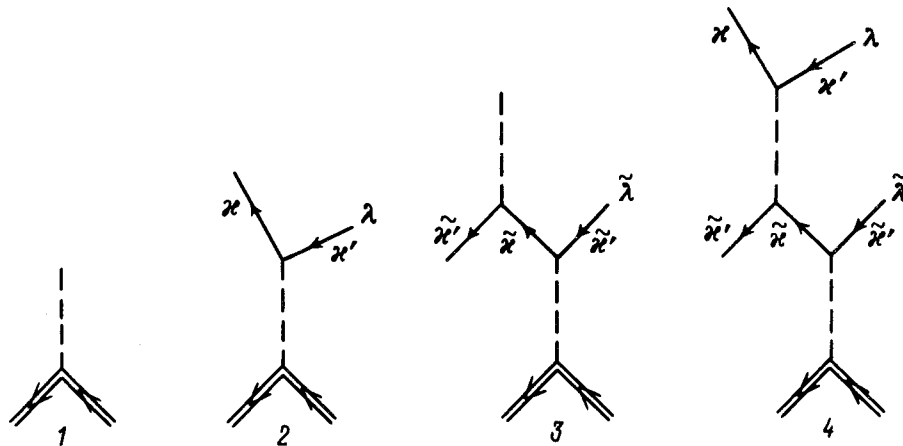


Рис. 1. Двойная линия - ядерная, одиночная - электронная, штриховая - фотонная. Диаграмма 2 - процесс обычной внутренней конверсии (и "внутреннего фотоэффекта") для электрона λ , диаграмма 3 - процесс "электронного мостика" (ЭМ) с электроном $\tilde{\lambda}$; диаграмма 4 - процесс внутренней конверсии в поле ЭМ

эффекта состоит в том, что при определенных параметрах физической системы (при малых энергиях ω и высоких мультипольностях L ядерных переходов) процесс третьего порядка по α может превосходить (и значительно) процесс первого порядка по α , хотя не только начальное, но и конечное состояние системы в этих процессах одинаковы. Ныне эффект ЭМ подтвержден в ряде теоретических работ ⁵⁻⁷ и имеются сообщения об его экспериментальном наблюдении ^{8,9}, хотя постановка таких экспериментов весьма трудоемка.

Однако до сих пор не исследован еще один эффект, непосредственно связанный с ЭМ и им обусловленный, причем сравнительно легко доступный экспериментальной проверке. Этот эффект был указан автором настоящей статьи еще в 1958 г. в исходной работе по ЭМ ¹ и назван там "мультипольным обменом" или "экранированием потенциалов мультиполей". В настоящей работе мы именуем его эффектом "внутренней конверсии в поле электронного мостика", ибо такое название лучше отражает суть явления.

А суть его заключается в следующем. Пусть эффект ЭМ велик для какого-либо электронного состояния λ . Тогда конверсионный переход любого другого электрона λ' происходит не только в электромагнитном поле, создаваемом током ядерного перехода, но и в электромагнитном поле, создаваемом током процесса ЭМ с электроном λ . График такой "внутренней конверсии в поле ЭМ" изображен на рисунке диаграммой 4. Диаграмма 4 имеет две лишние вершины по сравнению с процессом обычной конверсии, изображаемым диаграммой 2 и, на первый взгляд, вероятность процесса 4 должна быть $\sim \alpha^2 \approx 10^{-4}$ от вероятности процесса 2. Однако необычность 4 состоит в том, что две лишние вершины в 4 добавились из-за ЭМ и если эффект ЭМ велик по сравнению с обычным γ -излучением, то процесс 4 может давать заметный вклад по сравнению с 2 (и даже, в принципе, превосходить 2, если 3 значительно - на несколько порядков - превосходит 1).

Далее мы придерживаемся обозначений статей ¹⁻⁴, поясняя только основные формулы. Как показано в ¹⁻⁴, γ -излучение системы ядро + электронная оболочка в единицах гамма-излучения "голового ядра" равно:

$$\frac{N_q^{(3)}}{N_q^{(1)}} \approx 1 + \left(\sum_{\tilde{\kappa} \neq \tilde{\kappa}'} \beta_{\tilde{\kappa} \tilde{\kappa}'} \delta_{\tilde{\kappa} \tilde{\kappa}'} \right)^2, \quad (1)$$

где второй член и дает (в единицах $N_q^{(1)}$) число γ -квантов, испускаемых ядром через ЭМ (здесь $\beta_{\tilde{\kappa} \tilde{\kappa}'}$ - КВК на $\tilde{\kappa}'$ -оболочке при конечном состоянии $\tilde{\kappa}$, $\delta_{\tilde{\kappa} \tilde{\kappa}'} = \text{Re} R_{\tilde{\kappa} \tilde{\kappa}'} / \text{Im} R_{\tilde{\kappa} \tilde{\kappa}'}$, $R_{\tilde{\kappa} \tilde{\kappa}'}$ - радиальный матричный элемент конверсионного перехода).

Амплитуда конверсионного перехода λ -электрона в четвертом порядке имеет вид ¹:

$${}^\lambda U_{f_i}^{(4)} = {}^\lambda U_{f_i}^{(2)} - \pi^2 {}^\lambda H_{0\omega} {}^\lambda H_{\omega 0} {}^\lambda U_{f_i}^{(2)} - \pi^2 {}^\lambda H_{0\omega} \sum_{\tilde{\lambda} \neq \lambda} \tilde{\lambda} H_{\omega 0} \tilde{\lambda} U_{f_i}^{(2)}, \quad (2)$$

где ${}^\lambda U_{f_i}^{(2)}$ - амплитуда обычного конверсионного перехода,

$${}^\lambda H_{0\omega} = \text{Re} R_{\kappa \kappa'} T_{\kappa \mu \kappa' \mu'} = {}^\lambda H_{\omega 0}^*. \quad (3)$$

$T_{\kappa \mu \kappa' \mu'}$ - угловая часть матричных элементов (с факторами типа $\sqrt{\alpha}$).

В (2) третий член и описывает эффект внутренней конверсии в поле ЭМ. Но при этом (в отличие от ${}^\lambda H_{0\omega} {}^\lambda H_{\omega 0}$) конверсионный переход ${}^\lambda H_{0\omega}$ в поле излучения перехода $\tilde{\lambda} H_{\omega 0}$ нельзя факторизовать в виде $\text{Re} R_{\kappa \kappa'} T_{\kappa \mu \kappa' \mu'}$ · $\text{Re} R_{\tilde{\kappa} \tilde{\kappa}'} T_{\tilde{\kappa} \mu \tilde{\kappa}' \mu'}$, ибо здесь мы имеем обмен виртуальными фотонами между током электронного перехода $\psi_{\tilde{\kappa} \mu'}(\vec{r}) \rightarrow \psi_{\kappa \mu}(\vec{r})$ и током электронного перехода $\psi_{\tilde{\kappa} \mu}(\vec{r}') \rightarrow \psi_{\tilde{\kappa} \mu'}(\vec{r}')$ в ЭМ и при этом r может быть как больше, так и меньше r' . Поэтому

мы получим ¹⁾:

$$\lambda H_{0\omega} \tilde{\lambda} H_{\omega 0} = \mathcal{R}_{\kappa\kappa'\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'} T_{\kappa\mu\kappa'\mu'} T_{\tilde{\kappa}\tilde{\mu}\tilde{\kappa}'\tilde{\mu}'}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\kappa\kappa'\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'} = & \int_0^\infty dr \varphi_{\kappa\kappa'}(r) \left\{ h_L(\omega r) \int_0^r dr' \varphi_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}(r') j_L(\omega r') + j_L(\omega r) \int_r^\infty dr' \varphi_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}(r') h_L^*(\omega r') \right\} + \\ & + \int_0^\infty dr \chi_{\kappa\kappa'}(r) \left\{ h_{L-1}(\omega r) \int_0^r dr' \chi_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}(r') j_{L-1}(\omega r') + j_{L-1}(\omega r) \int_r^\infty dr' \chi_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}(r') h_{L-1}^*(\omega r') \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\varphi_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}(r) = r^2 \{ g_{\tilde{\kappa}}(r) g_{\tilde{\kappa}'}(r) + f_{\tilde{\kappa}}(r) f_{\tilde{\kappa}'}(r) \}, \quad (6a)$$

$$\chi_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}(r) = r^2 \left\{ \frac{\tilde{\kappa}' - \tilde{\kappa} - L}{L} f_{\tilde{\kappa}}(r) g_{\tilde{\kappa}'}(r) + \frac{\tilde{\kappa}' - \tilde{\kappa} - L}{L} g_{\tilde{\kappa}}(r) f_{\tilde{\kappa}'}(r) \right\}. \quad (6b)$$

Дальнейшие преобразования аналогичны проведенным в ¹⁻². В итоге для КВК на κ' оболочке атома получим, оставляя в числителе только эффект внутренней конверсии в поле ЭМ, а в знаменателе только ЭМ (остальные эффекты высших приближений всегда малы):

$$\beta_{\kappa'} = \sum_{\kappa} \beta_{\kappa\kappa'} \frac{\left| 1 - \sum_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'} \beta_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'} \frac{\mathcal{R}_{\kappa\kappa'\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}}{R_{\kappa\kappa'} R_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}} \right|^2}{1 + \left(\sum_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'} \beta_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'} \delta_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'} \right)^2}. \quad (7)$$

Эффект ЭМ уменьшает все КВК пропорционально, т.е. не изменяет отношений КВК на разных электронных оболочках и подоболочках. Но эффект внутренней конверсии в поле ЭМ, как видно из (7), зависит от κ' и может изменить эти отношения, что можно проверить на эксперименте, если эффект достаточно велик. Кроме того, при этом, в принципе, может измениться и время жизни ядерного состояния вследствие изменения вероятности конверсии из-за ЭМ, хотя сама вероятность ЭМ будет очень мала по сравнению с вероятностью обычного конверсионного перехода.

Как показано в ¹⁻⁷, эффект ЭМ может быть велик при малых ω и $EL \geq 2$. Но может ли быть велик эффект внутренней конверсии в поле такого ЭМ? На наш взгляд, этого можно ожидать вследствие того, что

$$\left| \mathcal{R}_{\kappa\kappa'\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'} / R_{\kappa\kappa'} R_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}^* \right| \gg \delta_{\kappa\kappa'} \delta_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'},$$

что, в свою очередь, ясно из формулы (5), где содержатся функции Ханкеля. Однако окончательный ответ здесь могут дать только точные расчеты на ЭВМ с обязательным учетом экранирования для электронных волновых функций, ибо приближенные расчеты могут на несколько порядков исказить величину ЭМ (вследствие малости $\text{Re} R_{\tilde{\kappa}\tilde{\kappa}'}$) и, следовательно, величину конверсии в поле ЭМ. Поэтому автор адресует настоящую работу в первую очередь тем теоретикам, которые располагают программами точных расчетов КВК на высоких подоболо-

¹⁾Для краткости изложения мы везде ограничимся EL -переходами, тем более, что для них эффект ЭМ значительно больше, чем для ML . Для простоты записи мы не выделяем в конверсионных матричных элементах конечные размеры ядра. Их легко учесть стандартными методами. Наконец, мы здесь не учитываем обменных матричных элементов для электронов λ и $\tilde{\lambda}$. Учет обмена сильно усложняет формулы, но не вносит ничего принципиально нового.

чках (начиная с L_{III}) при малых ω и с корректным учетом экранирования. Естественно, что при этом существенно знать, какие конкретные случаи стоит рассчитывать. Автор рекомендует расчет внутренней конверсии в поле ЭМ (расчет отношений КВК по формулам (7) и (5)) прежде всего для P -оболочек при $E3$ -переходе с $\omega = 75$ эВ в ^{235}U и для N -подоболочек при $E2$ -переходе с $\omega = 2,4$ кэВ в ^{205}Pb . Действительно, эффект ЭМ для этих или близких переходов велик, как показали точные расчеты ^{4,5,10}. И в то же время рассчитанные для этих подоболочек с корректным учетом экранирования отношения КВК заметно отличаются от экспериментальных (величины отклонений и ссылки на эксперимент см. в ¹⁰.) Поэтому автору представляется разумным проверить гипотезу о возможности большой величины "эффекта внутренней конверсии в поле ЭМ" именно на этих случаях.

Литература

1. Крутов В.А. Изв. АН СССР, сер.физ., 1958, 22, 162.
2. Крутов В.А., Мюллер К. Изв. АН СССР, сер.физ., 1958, 22, 171.
3. Крутов В.А., Фоменко В.Н. Ann. Phys. (L.), 1968, 21, 291.
4. Крутов В.А., Фоменко В.Н. Изв. АН СССР, сер.физ., 1972, 36, 2190.
5. Hinneburg D., Nagel M., Brunner G. Z. Phys. A, 1979, 291, 113.
6. Hinneburg D. Z. Phys. A, 1981, 300, 129.
7. Коломыец В.М., Кондратьев В.Н. Изв. АН СССР, сер.физ., 1990, 54, 25.
8. Kekez D., Ljubičić A., Pisk K., Lojan B.A. Phys. Rev. Lett., 1985, 55, 1366.
9. Беляевко В.С. и др. Тезисы 40-го совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л.: Наука, 1990, с.222.
10. Банд И.М., Листенгартен М.А., Тржасковская М.Б. Изв. АН СССР, сер.физ., 1990, 54, 15.