УДК 538.955

Неупругое рассеяние электронов на квантовой точке в режиме сильной кулоновской блокады

Е.В.Репин[1,2], И.С.Бурмистров[1,2]

[1]Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау

[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Важную роль для электронного транспорта при низких температурах играет рассеяние на магнитных примесях.[2] Часто магнитные примеси формируются за счет однократно заполненного локализованного уровня.[3] При этом, конечно, спин примеси равен ½, и его нельзя считать классическим. Недавние эксперименты показывают, что состояние с ненулевым спином может образовываться в ситуации нескольких локализованных уровней.[4] Целью работы является изучение специфики неупругого рассеяния на таком многоэлектронном локализованном магнитном состоянии на примере квантовой точки.

Так называемый универсальный гамильтониан для квантовой точки имеет вид

$$H_{QD} = \sum_{\alpha,\sigma} \varepsilon_\alpha d^+_{\alpha\sigma} d_{\alpha\sigma} + E_C(\mathrm{n} - \mathrm{N}_0)^2 - JS^2, \quad \mathrm{n} = \sum_{\alpha,\sigma} d^+_{\alpha\sigma} d_{\alpha\sigma}, \quad S = \frac{1}{2}\sum_{\alpha,\sigma,\sigma'} d^+_{\alpha\sigma}\sigma_{\sigma,\sigma'} d_{\alpha\sigma'}$$

А полный гамильтониан точки с резервуаром с учетом туннелирования имеет вид

$$H = H_{QD} + H_{FS} + H_T$$

где

$$H_{FS} = \sum_{p,\sigma} \varepsilon_p a^+_{p\sigma} a_{p\sigma}$$

гамильтониан электронов в резервуаре, а туннельный гамильтониан

$$H_T = \sum_{\alpha,p,\sigma} t_{\alpha p} d^+_{\alpha\sigma} a_{p\sigma} + h.c.$$

Полное сечение рассеяния электронов на точке имеет вид [1]

$$\sigma^\sigma_{tot}(\varepsilon) = -\frac{2}{v_F}\mathrm{Im} < \mathrm{p}\sigma \mid \mathrm{T}(\varepsilon) \mid \mathrm{p}'\sigma' >$$

а Т-матрица дается так называемой редукционной формулой

$$< \mathrm{p}\sigma \mid \mathrm{T}(\varepsilon) \mid \mathrm{p}'\sigma' > = -(G^0_{p'\sigma'}(\varepsilon))^{-1} G_{p'\sigma';p\sigma}(\varepsilon)(G^0_{p\sigma}(\varepsilon))^{-1}$$

все функции Грина электронов в резервуаре причинные. Удобнее, однако, ввести следующую величину

$$A^{\sigma}_{tot}(\varepsilon) = -\sum_{p} \delta(\varepsilon - \varepsilon_p) \mathrm{Im} < \mathrm{p}\,\sigma \mid \mathrm{T}(\varepsilon) \mid \mathrm{p}'\,\sigma' >$$

для которой в 4 порядке по коэффициентам туннелирования получается следующий ответ

$$A^{\sigma}_{tot}(\varepsilon) = \pi \sum_{\alpha\beta\gamma\eta} \sum_{i,f,\sigma'} Q_{\beta\alpha}(\varepsilon) Q_{\gamma\eta}(\varepsilon + E_i - E_f) p_i \frac{1 + e^{-\beta\varepsilon}}{1 + e^{-\beta(\varepsilon + \mathrm{E}_i - \mathrm{E}_f)}} \times$$

$$< i \mid d^{+}_{\gamma\sigma'} \frac{1}{\varepsilon - E_f + H_{QD}} d_{\alpha\sigma} + d_{\alpha\sigma} \frac{1}{\varepsilon - E_f + H_{QD}} d^{+}_{\gamma\sigma'} \mid f > \times$$

$$< f \mid d^{+}_{\beta\sigma} \frac{1}{\varepsilon - E_f + H_{QD}} d_{\eta\sigma'} + d_{\eta\sigma'} \frac{1}{\varepsilon - E_f + H_{QD}} d^{+}_{\beta\sigma} \mid \mathrm{i} >$$

где

$$Q_{\alpha\beta} = \sum_{p} \delta(\varepsilon - \varepsilon_p) \mathrm{t}_{\alpha p} \mathrm{t}^{+}_{\beta p}, \quad \mathrm{p}_i = \frac{e^{-\beta E_i}}{Z}, \quad \mathrm{Z} = \mathrm{Tr}(\mathrm{e}^{-\beta H_{QD}})$$

В случае кулоновской блокады для неупругой части сечения, приводящей к сбою фазы, получается

$$A^{\sigma}_{inel}(\varepsilon) = \frac{4\pi}{E_C^2} \sum_{\alpha\beta\gamma\eta} \sum_{i \neq f,\sigma'} Q_{\beta\alpha}(\varepsilon) Q_{\gamma\eta}(\varepsilon + E_i - E_f) p_i \frac{1 + e^{-\beta\varepsilon}}{1 + e^{-\beta(\varepsilon + \mathrm{E}_i - \mathrm{E}_f)}} < i \mid d^{+}_{\eta\sigma'} d_{\beta\sigma} \mid \mathrm{f} >< f \mid d^{+}_{\alpha\sigma} d_{\gamma\sigma'} \mid \mathrm{i} >$$

Таким образом, выражение для сечения рассеяния нельзя представить только в виде средних от матричных элементов оператора полного спина квантовой точки, как это было бы в случае магнитного атома.

Литература

1. *L. Borda, L. Fritz, N. Andrei, G. Zarand,* Phys. Rev. B 75, 235112 (2007).
2. *A. A. Abrikosov*, Fundamentals of the Theory of Metals, (North Holland, Amsterdam, 1988).
3. *Schrieffer, J.R.; Wolff, P.A.* (September 1966). "Relation between the Anderson and Kondo Hamiltonians". Physical Review 149 (2): 491.
4. *N. Teneh, A. Yu. Kuntsevich, V. M. Pudalov, and M. Reznikov*, Phys. Rev. Lett. 109, 226403 (2012).