

Статья «RESONANT KONDO TRANSPARENCY OF A BARRIER WITH QUASILocal IMPURITY STATES» ( GLAZMAN L.L., RAIKH M.E.)

Leonid Glazman. Yale University, USA

Статья [1] предсказала, что наличие в барьере локализованных электронных состояний с энергиями под уровнем Ферми приведет к резкому повышению туннельной прозрачности барьера. Наиболее интересная сторона предсказания это то, что состояния глубоко под уровнем Ферми хотя и не вносят непосредственного вклада в проводимость, ведут к образованию коллективного резонанса в прозрачности барьера для электронов точно на уровне Ферми. Этот резонанс есть центральное проявление эффекта Кондо. Установив связь между эффектом Кондо и туннельной проводимостью, статья открыла путь детальным экспериментальным исследованиям эффекта Кондо с помощью квантовых точек.

Известное из учебников проявление эффекта Кондо состоит в росте удельного сопротивления нормального металла содержащего малую концентрацию магнитных примесей при понижении его температуры [2]. Это экспериментальное наблюдение было сделано еще в 1930-х и объяснено Джуном Кондо в 1960-х. В теории Кондо амплитуда рассеяния электронов на магнитных примесях вычисляется пертурбативно, во втором порядке теории возмущений по электрон-примесному взаимодействию. Этого было достаточно для объяснения практически всех экспериментов с макроскопическими образцами. В то же время, более совершенные теории предсказывали, что при достаточно низких энергиях электронов их рассеяние должно стать чрезвычайно сильным, достигая так называемого унитарного предела. Практических путей для соответствующих экспериментальных исследований, однако, не было. Один из таких путей был намечен этой статьей в Письмах в ЖЭТФ и в независимо сделанной работе [3]. Эти две работы указали на существование, благодаря эффекту Кондо, резонансной прозрачности в туннельном контакте.

Магнитная примесь в туннельном барьере может быть имитирована квантовой точкой. Для этого затворное напряжение контролирующее заряд точки нужно выбрать так, чтобы число электронов в точке было нечетным; это создает состояние со спином  $S=1/2$ . Ранние надежные наблюдения [4] Кондо-прозрачности в электронном транспорте через квантовую точку появились примерно через десять лет после публикации двух упомянутых теоретических работ. Они привели к взрывному развитию этого направления исследований. Оказалось, что эффект Кондо в мезоскопических устройствах - явление повсеместное, коренящееся в комбинации эффектов вырождения электронных уровней и электронного взаимодействия [5]. Например, эффект Кондо может возникнуть, если два различных орбитальных состояния приведены в резонанс с помощью зеемановского расщепления [6]. Фактически, с начала 2000-х годов эффект Кондо в квантовых точках превратился из желанного загадочного явления в рутинно наблюдаемый феномен. Временами он даже рассматривается как помеха. Идущий в настоящее время поиск твердотельных реализаций майорановских фермионов служит примером: их проявление в туннельных экспериментах можно спутать с проявлением эффекта Кондо [7].

- [1] L.L. Glazman, M.E. Raikh, JETP Letters 27, 452 (1988)
- [2] A.A. Abrikosov, *Fundamentals of the Theory of Metals* (North-Holland, Amsterdam, 1988)
- [3] T.K. Ng and P.A. Lee, Phys. Rev. Lett. **61**, 1768 (1988)
- [4] D. Goldhaber-Gordon *et al.*, Nature **391**, 156 (1998); S.M. Cronenwett, T.H. Oosterkamp and L.P. Kouwenhoven, Science **281**, 540 (1998); J. Schmid *et al.*, Physica B **256-258**, 182 (1998).
- [5] L.I. Glazman and M. Pustilnik, Lectures notes of the Les Houches Summer School 2004, in: "*Nanophysics: Coherence and Transport*," eds. H. Bouchiat *et al.* (Elsevier, 2005), pp. 427-478
- [6] M. Pustilnik, L. I. Glazman, D. H. Cobden, and L. P. Kouwenhoven, Lecture Notes in Physics, **579**, 3 (2001)
- [7] W. Chang, V. E. Manucharyan, T. S. Jespersen, J. Nygard, and C. M. Marcus, Phys. Rev. Lett. **110**, 217005 (2013)