

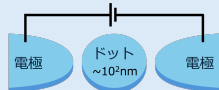
多軌道量子ドット系の三体的Fermi流体補正に対する軌道分裂の効果

本山海司（理学研究科 物理学専攻 電子相関物理学研究室）

目的 多軌道量子ドット系の非線形輸送現象およびそれに寄与する局在電子間の三体相関について、局在軌道の縮退が解けること（軌道分裂）による影響を調べる。

量子ドット

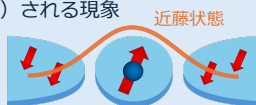
ナノ空間にごく少数の電子を閉じ込める微小な素子
量子多体系の実験的プラットフォーム



近藤効果

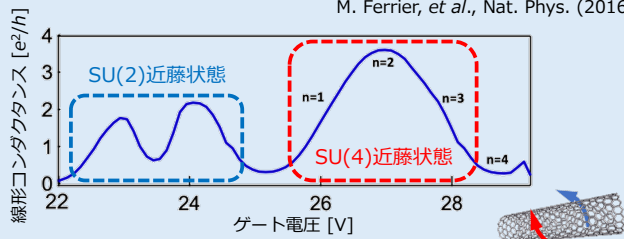
低エネルギー領域において、ドットの局在電子スピンが電極の伝導電子スピンによりスクリーン（遮蔽）される現象

スピン1重項 ($S=0$) の近藤状態によりドットを介した電気伝導が起こりやすくなる



背景：カーボンナノチューブ（CNT）量子ドットの実験

M. Ferrier, et al., Nat. Phys. (2016).



スピンのSU(2)対称性 & CNTの円筒軸周りの対称性 → SU(4)対称
外場等によって軸周りの対称性が破れた（軌道分裂） → SU(2)対称

N準位 Anderson不純物模型（本研究：N=4）

$$H = \sum_{\sigma=1}^N \epsilon_{d\sigma} n_{d\sigma} + \frac{U}{2} \sum_{\sigma \neq \sigma'} n_{d\sigma} n_{d\sigma'} + \sum_{\nu=L,R} \int_{-D}^D d\epsilon \epsilon c_{\nu\sigma}^\dagger c_{\nu\sigma} - \sum_{\nu=L,R} v_\nu \int_{-D}^D d\epsilon \sqrt{\rho_c} \left(c_{\nu\sigma}^\dagger d_\sigma + d_\sigma^\dagger c_{\nu\sigma} \right).$$

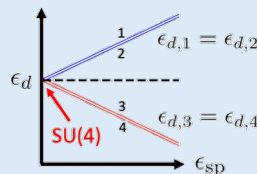
$\sigma = 1, 2, 3, 4$: 局在準位の添字
 $\nu = L, R$: 電極の添字
 $\epsilon \in [-D, D]$: 伝導電子のエネルギー
 D : 伝導バンド幅の半分
 $\epsilon_{d\sigma}$: 局在準位のエネルギー
 U : 局在電子間のクーロン相互作用

$d_\sigma, c_{\nu\sigma}$: 局在電子および伝導電子の消滅演算子
 $n_{d\sigma}$: 局在電子の数演算子
 $\rho_c = 1/2D$: 伝導電子の状態密度
 $\Gamma_\sigma = \pi \rho_c v_\sigma^2$: トンネル結合強度
 $\Delta = \Gamma_L + \Gamma_R$: 共鳴準位の共鳴幅

局在軌道の分裂パラメータ ϵ_{sp}

$$\begin{cases} \epsilon_{d1} = \epsilon_{d2} = \epsilon_d + \epsilon_{sp} \\ \epsilon_{d3} = \epsilon_{d4} = \epsilon_d - \epsilon_{sp} \end{cases}$$

SU(4) → SU(2) × SU(2)



局在電子の相関関数

$$\text{局在電子数 } \langle n_{d\sigma} \rangle \xrightarrow{T \rightarrow 0} \frac{\delta_\sigma}{\pi}, \quad \delta_\sigma: \text{位相のずれ}$$

三体相関



$$\text{二体相関 } \chi_{\sigma_1 \sigma_2} \equiv \int_0^\beta d\tau \langle \delta n_{d\sigma_1}(\tau) \delta n_{d\sigma_2} \rangle, \quad \delta n_{d\sigma} \equiv n_{d\sigma} - \langle n_{d\sigma} \rangle.$$

$$\text{三体相関 } \chi_{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}^{[3]} \equiv - \int_0^\beta d\tau \int_0^\beta d\tau' \langle T_\tau \delta n_{d\sigma_1}(\tau) \delta n_{d\sigma_2}(\tau') \delta n_{d\sigma_3} \rangle.$$

軌道分裂がある場合の SU(2) × SU(2) 対称性の下において、相関関数の独立な成分が次のようになることを示した。

位相のずれ δ_1, δ_4 ,

二体相関 $\chi_{11}, \chi_{12}, \chi_{14}, \chi_{34}, \chi_{44}$,

三体相関 $\chi_{111}^{[3]}, \chi_{112}^{[3]}, \chi_{114}^{[3]}, \chi_{124}^{[3]}, \chi_{444}^{[3]}, \chi_{443}^{[3]}, \chi_{441}^{[3]}, \chi_{431}^{[3]}$, 2+5+8=15個の独立な成分 (SU(4)対称の場合、6個)

局所Fermi流体論による非線形輸送係数の定式化

A. Oguri & A. C. Hewson, PRL (2018), Y. Teratani et al., PRL (2020).

微分コンダクタンス

$$\frac{dI}{dV} = \frac{e^2}{h} \left[g_0 - c_T \left(\frac{\pi T}{T^*} \right)^2 - c_V \left(\frac{eV}{T^*} \right) + \dots \right],$$

$$\text{特性エネルギー } T^* = \frac{1}{N \sum_{\sigma=1}^N 4\chi_{\sigma\sigma}}.$$

電流ノイズ

$$S_{\text{noise}}^{\text{QD}} = \int_{-\infty}^{\infty} dt \langle \delta \hat{I}(t) \delta \hat{I}(0) + \delta \hat{I}(0) \delta \hat{I}(t) \rangle_V$$

$$= \frac{2e^2 |eV|}{h} \left[s_0 + c_S \left(\frac{eV}{T^*} \right)^2 + \dots \right],$$

$$\text{線形コンダクタンス } g_0 = \sum_{\sigma=1}^N \sin^2 \delta_\sigma.$$

$$\text{線形ノイズ } s_0 = \sum_{\sigma=1}^N \sin^2 \delta_\sigma (1 - \sin^2 \delta_\sigma).$$

非線形項（第二主要項）の係数は、局在電子の三体相関までの相関関数のみを用いて厳密に計算できる。

本研究で、軌道分裂がある場合における第二主要項の係数の定式化を行った。

例) 微分コンダクタンスの $(eV)^2$ 項の係数 c_V

$$c_V = \frac{\pi^2}{64} (w_V + \theta_V), \quad \begin{array}{l} \text{二体相関の寄与 } w_V \text{ と} \\ \text{三体相関の寄与 } \theta_V \text{ に分割できる} \end{array}$$

二体相関の寄与

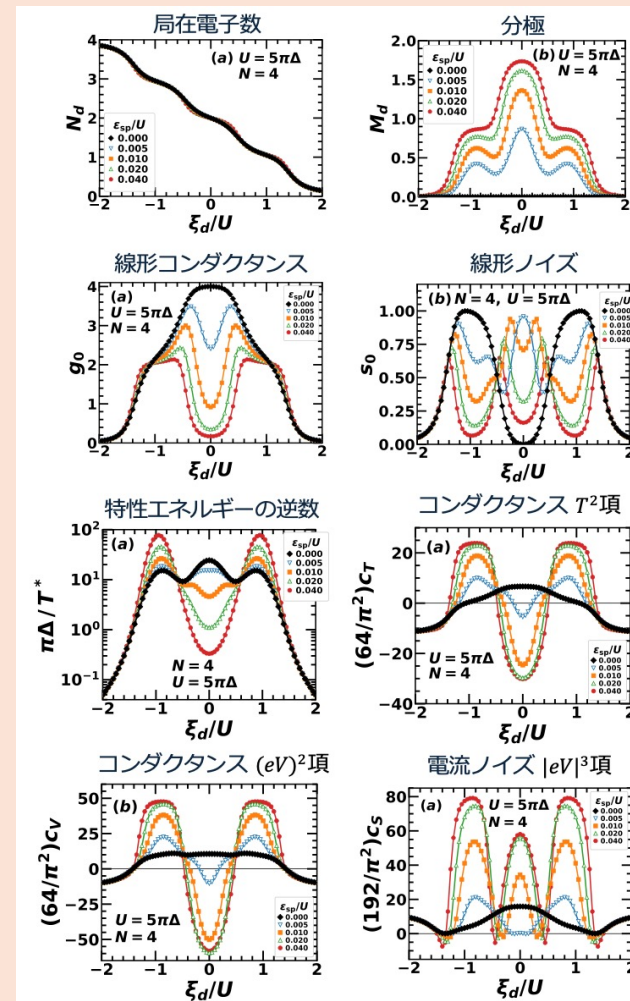
$$\frac{w_V}{(4T^*)^2} = -2 \cos 2\delta_1 \left[\chi_{11}^2 + 5(\chi_{12}^2 + 2\chi_{14}^2) \right] - 2 \cos 2\delta_4 \left[\chi_{44}^2 + 5(\chi_{43}^2 + 2\chi_{41}^2) \right],$$

三体相関の寄与

$$\frac{\theta_V}{(4T^*)^2} = \frac{\sin 2\delta_1}{\pi} \left[\chi_{111}^{[3]} + 3(\chi_{112}^{[3]} + 2\chi_{114}^{[3]}) \right] + \frac{\sin 2\delta_4}{\pi} \left[\chi_{444}^{[3]} + 3(\chi_{443}^{[3]} + 2\chi_{441}^{[3]}) \right],$$

数値くりこみ群による結果 ($N=4, U=5\pi\Delta$)

横軸：ゲート電圧 $\xi_d = \epsilon_d + (3/2)U$.



1/4-filling ($N_d = 1$): $\epsilon_{sp} = 0$: SU(4)近藤, $\epsilon_{sp} > 0$: SU(2)近藤
SU(2)近藤のプラトー構造: 二体相関の寄与が主要

1/2-filling ($N_d = 2$): $\epsilon_{sp} = 0$: SU(4)近藤, $\epsilon_{sp} > 0$: 絶縁体的
 ϵ_{sp} の中間領域における、三体相関の寄与の
一時的なピークが特徴的

まとめ

$N=4$ の多軌道量子ドット系の軌道分裂による SU(4)-SU(2)近藤状態間のクロスオーバーが、三体相関を通して低エネルギー領域の非線形輸送に与える影響を数値くりこみ群により定量的に計算した。