XX Jornadas de Ciencias, Tecnologías e Innovación UNR

CORRELACIONES DE ESPÍN ENTRE IMPUREZAS MAGNÉTICAS MEDIADAS POR UN SUSTRATO SUPERCONDUCTOR

PIROLA, Nahuel[1]; ROSSI, Stéfano[1,2]; ORLANDINI, Adelina[1,2]; MANUEL, Luis[1,2]; HAMAD, Ignacio[1,2]

[1]**Facultad de Ciencias Exactas, Ingenierías y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario**

[2]**Instituto de Física de Rosario (IFIR, CONICET & UNR)**

Palabras clave: impurezas magnéticas; superconductividad; efecto Kondo; interacción RKKY; DMRG.

INTRODUCCIÓN

Sobre un **superconductor**, las impurezas magnéticas están sometidas a tres efectos en competencia: el **efecto Kondo** (los electrones de conducción apantallan el espín de cada impureza), la **interacción RKKY** (Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida: un acople indirecto entre impurezas a través de los electrones) y la **brecha superconductora** 2Δ.

Para un acople espín–electrón **antiferromagnético** (J > 0) existen cuatro fases distintas (Figura 1; Plorin y Potthoff, 2024). En este trabajo estudiamos el caso **ferromagnético** (J < 0).

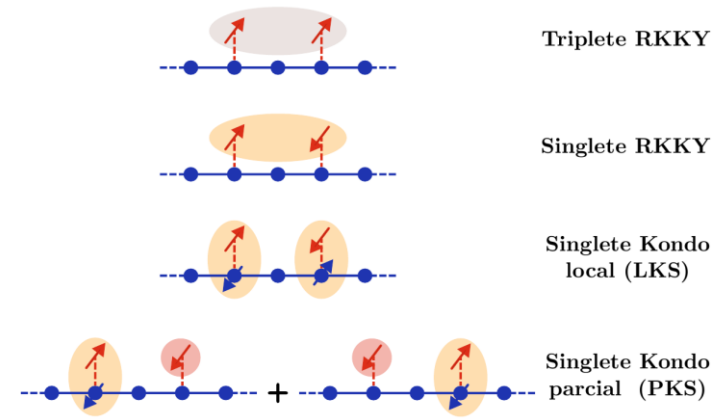


Figura 1. Fases para J > 0. Flechas: impurezas; círculos: sitios de la cadena.

OBJETIVOS / HIPÓTESIS

- Estudiar el acople **ferromagnético** (J < 0) de dos impurezas de espín 1/2.
- Obtener el **diagrama de fases** (J, Δ) según el espín total.
- Caracterizar las **correlaciones de espín** entre impurezas y con los electrones.

Hipótesis: con J < 0 no aparece ninguna fase de tipo Kondo, ni el singlete Kondo ni estados localizados de impureza–electrón. Solo sobreviven fases de tipo RKKY.

METODOLOGÍA

Modelo: cadena de L = 83 sitios (*hopping* o salto t = 1) con apareamiento superconductor uniforme Δ. Dos impurezas de espín 1/2, $\mathbf{S}_1$ y $\mathbf{S}_2$, separadas por d = 2 sitios, se acoplan con intensidad J al espín del electrón que tienen debajo, $\mathbf{s}_{i1}$ y $\mathbf{s}_{i2}$:

$$H = -t\sum_{i,\sigma}\left(c^{\dagger}_{i,\sigma}c_{i+1,\sigma} + \text{h.c.}\right) + J\sum_{m}\mathbf{S}_m\cdot\mathbf{s}_{i_m} + \Delta\sum_{i}\left(c^{\dagger}_{i\uparrow}c^{\dagger}_{i\downarrow} + \text{h.c.}\right)$$

(h.c.: conjugado hermítico)

Método: grupo de renormalización de la matriz densidad (DMRG, por sus siglas en inglés), que calcula con alta precisión el estado fundamental de sistemas unidimensionales, y las medidas de entrelazamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Para J < 0 hay **solo dos fases** (Figura 2b): **triplete** (S = 1) para Δ ≲ 0,35 y **singlete** (S = 0) en el resto. **No aparecen fases Kondo.**
- La frontera triplete–singlete está en Δc ≈ 0,35 para todo J, el mismo valor que la transición RKKY del caso J > 0 a acople débil (Figura 2a) .
- $\langle \mathbf{S}_1\cdot\mathbf{S}_2\rangle$ ≈ +0,25 en la fase triplete y ≈ −0,75 en la singlete: las impurezas forman un **triplete** y un **singlete** prácticamente exactos, respectivamente.
- $\langle \mathbf{S}_m\cdot\mathbf{s}_{im}\rangle$ es positiva pero pequeña (~ 0,1): **no hay apantallamiento Kondo**.

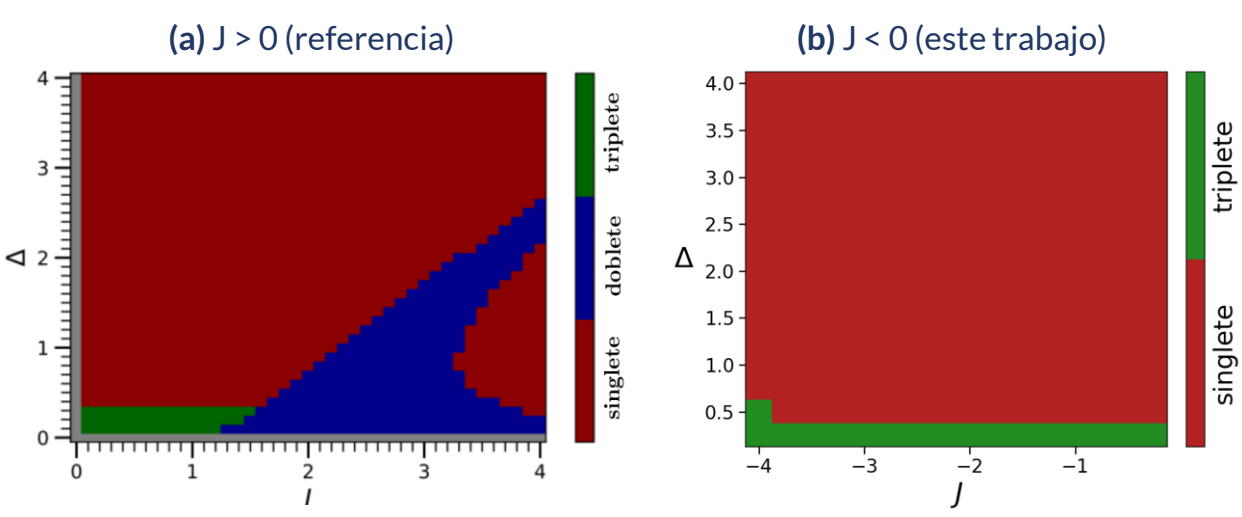


Figura 2. Espín total del estado fundamental en el plano (J, Δ). **(a)** J > 0, adaptado de Plorin y Potthoff (2024). **(b)** J < 0: solo aparecen singlete y triplete.

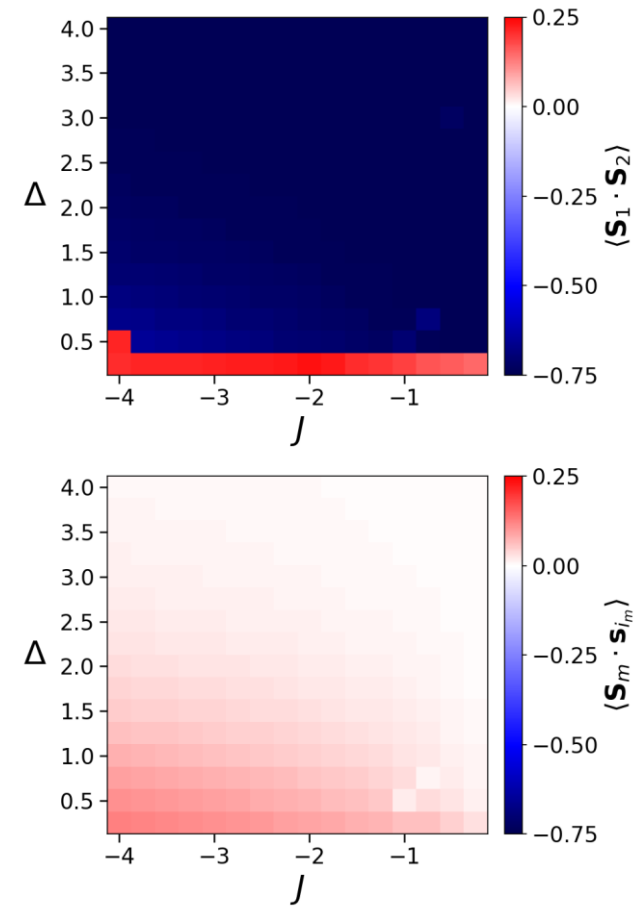


Figura 3. Correlaciones de espín para J < 0. **Arriba:** entre impurezas, $\langle \mathbf{S}_1\cdot\mathbf{S}_2\rangle$. **Abajo:** impureza–electrón, $\langle \mathbf{S}_m\cdot\mathbf{s}_{im}\rangle$.

CONCLUSIONES

Con acople **ferromagnético** el efecto Kondo queda suprimido y el sistema está gobernado por la competencia entre la **interacción RKKY** y la **brecha superconductora**. Al aumentar Δ, las impurezas pasan de alinearse (triplete) a formar un singlete entre sí, con Δ_c ≈ 0,35 casi independiente de J. **Próximos pasos:** estudiar el entrelazamiento en cada fase y extender el análisis a cables superconductores topológicos (Diniz y Vernek, 2023).

REFERENCIAS

Plorin, C. y Potthoff, M. (2024). Kondo screening and indirect magnetic exchange through a conventional superconductor studied by the density-matrix renormalization group. *Physical Review B*, *110*, 085119.

Diniz, G. S. y Vernek, E. (2023). Majorana correlations in quantum impurities coupled to a topological wire. *Physical Review B*, *107*, 045121.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentes en este trabajo fueron obtenidos utilizando los recursos del Centro de Cómputos de CCT-Rosario, miembro del Sistema Nacional de Computación de Alto Desempeño (SNCAD, MincyT- Argentina)