

## تونل زنی جوزفسونی از مولکول های مغناطیسی ناهمسانگرد

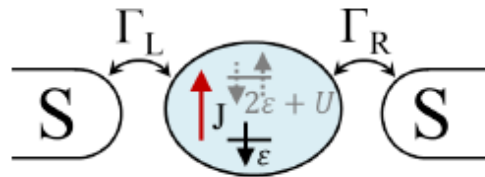
دشتی، نسترن<sup>۱</sup>؛ قربانزاده مقدم، علی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، صندوق پستی ۴۵۱۹۵-۱۱۵۹، زنجان، ایران

### چکیده

در این مقاله به بررسی اثر جوزفسون در مولکول مغناطیسی ناهمسانگرد که در اتصال با دو الکتروود ابررسانا قرار گرفته است می پردازیم. جریان جوزفسون عبوری در حد هم-تونل زنی را با روش نموداری زمان حقیقی از این ساختار بدست می آوریم. نشان می دهیم با داشتن جریان برحسب جفتیگی، شاهد گذار صفر به پی در جریان هستیم.

تک مولکول مغناطیسی (SMM) بستری مناسب برای توسعه ی سیستم های ترابرد اسپینی است. از اینرو در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بدلیل اینکه در تک مولکول مغناطیسی تونل زنی کوانتومی، گسستگی ترازها و برهمکنش کولنی بسیار بالا است، بررسی اثر جوزفسون از میان یک SMM با ویژگی های مغناطیسی که در تضاد با ابرسانایی بنظر می رسد، جالب خواهد بود. سیستم را در رژیم انسداد کولنی در نظر می گیریم. بنابراین جریان جوزفسونی را به صورت هم تونل زنی با روش نموداری زمان حقیقی بدست می آوریم [۱، ۳].



شکل ۱: اتصال جوزفسونی مولکول مغناطیسی ناهمسانگرد با دو الکتروود ابررسانا

ما از مدل زیر برای درک فیزیکی اثر جوزفسونی در تک مولکول مغناطیسی که در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده می کنیم [۲، ۴]:

$$H = H_D + \sum_{\eta} (H_{s,leads\eta} + H_{tunn,\eta})$$

$$H_M = \sum_{\sigma} \varepsilon d_{\sigma}^{\dagger} d_{\sigma} + U n_{\uparrow} n_{\downarrow} - D S_z^2 + B(S_z + s_{e_z}) + \frac{M}{2}(S_+^2 + S_-^2) + J S \cdot s_e$$

$$H_{s,leads} = \sum_{\substack{k,\sigma \\ \eta=L,R}} (\xi_{k\eta} C_{k\sigma\eta}^{\dagger} C_{k\sigma\eta} + \Delta_{\eta} C_{k\uparrow\eta}^{\dagger} C_{-k\downarrow\eta}^{\dagger} + \Delta_{\eta}^* C_{-k\downarrow\eta} C_{k\uparrow\eta})$$

$$H_{tunn,\eta} = \sum_{k,\sigma} V_{\eta} C_{\eta k\sigma}^{\dagger} d_{\sigma} + H.C.$$

$\Delta, B, J, U, \varepsilon$  به ترتیب انرژی تراز، برهم‌کنش کولنی، قدرت جفت شدگی تبادل بین اسپین مولکولی و الکترونیکی، میدان مغناطیسی و گاف ابررسانایی را نمایش می‌دهند. بدلیل وجود ناهمسانگردی، عبارت ثابت ناهمسانگردی  $D$  و تونل‌زنی کوانتومی مغناطیسی شده  $M$  را اضافه می‌کنیم. همچنین چون برهم‌کنش کولنی بسیار بزرگ است، فقط یک الکترون می‌تواند تراز الکترونیکی را اشغال کند. هامیلتونی  $H_{s,leads}$ ، مدل  $BCS$  ابررسانا در نظریه میدان متوسط است. برای توصیف دینامیک مولکول مغناطیسی کافیت که ماتریس چگالی کاهیده  $P_{\chi_2}^{\chi_1}(t) = \langle \chi_2 | \rho | \chi_1 \rangle$  و معادله‌ی مادر حاکم بر آن را بیابیم که به صورت زیر داده می‌شود:

$$\frac{d}{dt} P_{\chi_2}^{\chi_1}(t) + i(E_{\chi_1} - E_{\chi_2}) P_{\chi_2}^{\chi_1}(t) = \sum_{\chi_1' \chi_2'} \int_0^{\infty} dt' W_{\chi_2 \chi_2'}^{\chi_1 \chi_1'} P_{\chi_2}^{\chi_1}(t')$$

$W_{\chi_2 \chi_2'}^{\chi_1 \chi_1'}$  آهنگهای گذار تعمیم یافته هستند که با استفاده از روش نموداری زمان حقیقی [۲] قابل محاسبه اند. ما خود را به رژیم جفت شدگی ضعیف ( $\Gamma \ll kT$ ) منحصر می‌کنیم که امکان تونل زنی جفتهای کوپر وجود ندارد. بنابراین تونل‌زنی مراتب بالاتر می‌تواند جریان ایجاد کند که پایین‌ترین مرتبه هم‌تونل‌زنی (*cotunneling*) است. در نتیجه رابطه‌ی جریان بدین صورت داده می‌شود:

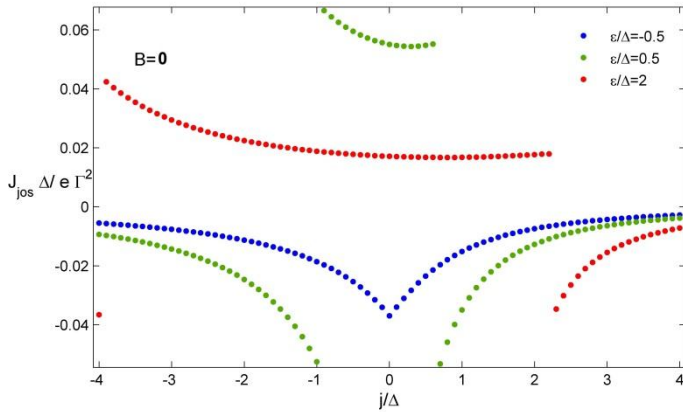
$$J_{cot} = -e \sum_{\chi \chi'} [W_{\chi \chi'}^{\chi \chi'} L^{(2)} P_{\chi'}^{\chi(0)} + W_{\chi' \chi}^{\chi \chi'} L^{(1)} P_{\chi'}^{\chi(1)}]$$

مساله را چنین بررسی می‌کنیم که به ازای هر  $\varepsilon, B, J$  دلخواه کدام حالت از نه حالت مولکول، حالت پایه‌ی سیستم خواهد بود. برای حالت خاصی که تونل‌زنی کوانتومی مغناطیسی شده  $M$  را در نظر نمی‌گیریم، در میدان مغناطیسی مثبت (منفی) سه حالت ممکن برای حالت پایه داریم. جدول ۱، بر حسب بازه‌ی پارامترهای یاد شده، حالت پایه را نشان می‌دهد.

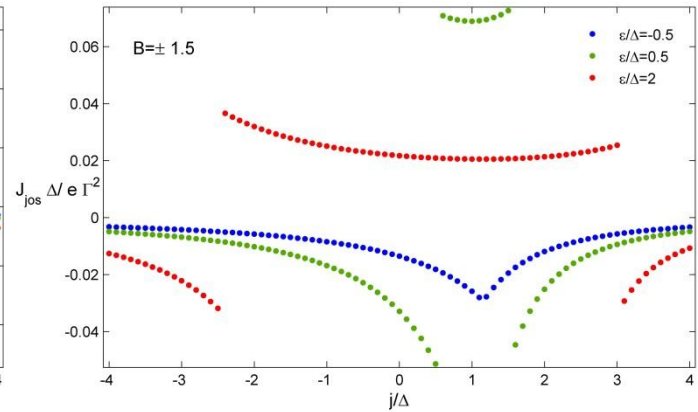
جدول ۱: محدوده حالت پایه برای  $M=0$

<b>B&lt;0</b>	$4B - 2 + 3j + \sqrt{4 + 4j + 9j^2} < 0$	$\varepsilon < -\frac{B}{2} - \frac{j}{2}$	$ \uparrow 1\rangle$
		$\varepsilon > -\frac{B}{2} - \frac{j}{2}$	$ 0, 1\rangle$
	$4B - 2 + 3j + \sqrt{4 + 4j + 9j^2} > 0$	$4\varepsilon > j + \sqrt{4 + 4j + 9j^2} + 2B - 2$	$ \uparrow 0\rangle + \alpha  \downarrow 1\rangle$
		$4\varepsilon < j + \sqrt{4 + 4j + 9j^2} + 2B - 2$	
<b>B&gt;0</b>	$-4B - 2 + 3j + \sqrt{4 + 4j + 9j^2} < 0$	$\varepsilon < \frac{B}{2} - \frac{j}{2}$	$ \downarrow -1\rangle$
		$\varepsilon > \frac{B}{2} - \frac{j}{2}$	$ 0, -1\rangle$
	$-4B - 2 + 3j + \sqrt{4 + 4j + 9j^2} > 0$	$4\varepsilon > j + \sqrt{4 + 4j + 9j^2} - 2B - 2$	$\alpha  \uparrow -1\rangle +  \downarrow 0\rangle$
		$4\varepsilon > j + \sqrt{4 + 4j + 9j^2} - 2B - 2$	

## نتیجه گیری



شکل ۳: جریان جوزفسون از SMM برحسب قدرت جفتی برای حالتی که فرض شده  $B=0$  و  $M=D$  است.



شکل ۴: جریان جوزفسون از SMM برحسب قدرت جفتی برای حالتی که فرض شده  $B=±1.5$  و  $M=D$  است.

جریان جوزفسونی که توسط زوج های کوپر انتقال می یابد، به دو صورت جریان جوزفسونی صفر و  $\pi$  است. اگر تراز الکترونیکی دارای تک الکترون باشد، جریان جوزفسونی  $\pi$  را داریم که ترتیب اسپینی جفت کوپر بعد از انتقال از یک الکترون به الکترون دیگر تغییر می کند. در غیر اینصورت جریان جوزفسونی صفر را داریم. در شکل ۲ و ۳ به ازای  $\epsilon = 0.5$  و  $2$  از سمت  $j$  های منفی در اولین گذار، جریان از  $\pi$  به صفر تغییر می کند و در  $j$  مثبت، گذار از جریان صفر به  $\pi$  را داریم.

## مراجع

1. L.Jaurigue, "Superconducting Proximity Effect in Magnetic Molecules", Master thesis(2013).
2. M. Gavernale, M. Pala, J. König, *Phys.Rev. B* **77**,134513(2008).
- 3.C.Timm, *Phys.Rev.B***76**,014421(2007).
- 4.I.A.Sadovskyy,D.Chevallier,T.Jonckheere,M.Lee,S.Kawabata,T.Martin, *Phys.Rev.B***84**,184513(2011).